



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ENERGIAPAINDLIKKUSE TASUVUS AGREGEERITUD JUHTIMISEL

COST-EFFECTIVENESS OF ENERGY FLEXIBILITY IN AGGREGATED MANAGEMENT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sten Vainu

Üliõpilaskood: 221366AAVM

Juhendajad: Vahur Maask, teadur
Freddy Plaum, doktorant-nooremteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Kaasjuhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sten Vainu

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Energiapaindlikkuse tasuvus agregeeritud juhtimisel“,

mille juhendajad on Vahur Maask ja Freddy Plaum,

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

13.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Sten Vainu, 221366AAVM
Õppekava, peaariala: AAVM02/22, Elektroenergeetika
Juhendajad: teadur, Vahur Maask,
doktorant-nooremteadur, Freddy Plaum,

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Energiapaindlikkuse tasuvus agregeeritud juhtimisel*
(inglise keeles) *Cost-effectiveness of energy flexibility in aggregated management*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Milline on paindlike seadmete roll energiapaindlikkuse tagamisel?
2. Millist hinnastamismudelit kasutada paindlike seadmete agregeeritud juhtimisel, et võtta arvesse kasutajate mugavust ja kulude kokkuhoidu?
3. Kuidas simuleerida paindlike seadmete kasutust bilansienergiaturul?
4. Millist mõju omab agregeeritud juhtimine paindlike seadmete energiatarbimisele ja -kulule?
5. Milline on agregeeritud juhtimise tasuvus?

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	05.02.24
2.	Lähteandmete kogumine	12.02.24
3.	Sissejuhatuse koostamine	19.02.24
4.	Peatüki "Energiapaindlikkuse ülevaade" kirjutamine	04.03.24
5.	Peatüki "Paindlike seadmete hinnastamismudel" kirjutamine	11.03.24
6.	Arvutuste/mõõtmiste/simuleerimise teostamine	25.03.24
7.	Peatüki "Bilansienergiaturul osalemise simulatsioon" kirjutamine	01.04.24
8.	Peatüki "Paindlike seadmete agregeeritud juhtimise tasuvuse analüüs" kirjutamine	08.04.24
9.	Järelduste kirjutamine	14.04.24
10.	Kokkuvõtte koostamine	21.04.24

11.	Töö esimene versioon valmis	28.04.24
12.	Juhendajale läbilugemiseks saatmine	29.04.24
13.	Paranduste sisseviimine	05.05.24
14.	Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	06.05.24
15.	Töö lõplik versioon valmis	12.05.24

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 13.05.2024 a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	4
EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS	10
1. ENERGIAPAINDLIKKUS	12
1.1 Energiapaindlikkuse ülevaade	12
1.2 Paindlikud seadmed	14
1.3 Paindlike seadmete agregeeritud juhtimine	16
1.3.1 Agregaatori funktsionaalsus	17
2. PAINDLIKKUSTEENUSED JA PAINDLIKE SEADEMETE HINNASTAMISMUDELID	18
2.1 Tasakaalustamisteenused	18
2.1.1 Bilansienergiaturg	19
2.1.2 Baltimaade kasutatav bilansienergiaturu teenus	20
2.2 Hinnastamismudel	22
2.2.1 Õhksoojuspumba hinnakujundus	24
2.2.2 Veeboileri hinnakujundus	25
2.2.3 Akusalvesti hinnakujundus	26
2.3 Üles- ja allareguleerimine	27
3. BILANSIENERGIATURUL OSALEMISE SIMULATSIOON	28
3.1 Veeboileri paindlikkuse hind	28
3.2 Akusalvesti paindlikkuse hind	30
3.3 Õhksoojuspumba paindlikkuse hind	31
3.4 Bilansienergiaturu mudel	33
4. PAINDLIKE SEADEMETE AGREGEERITUD JUHTIMISE TASUVUSE ANALÜÜS	36
4.1 Veeboileri analüüs	37
4.1.1 Üles- ja allareguleerimise aktiveerimised	37
4.1.2 Veeboileri üles- ja allareguleeritud energia	38
4.1.3 Veeboileri üles- ja allareguleerimise tulu	39
4.1.4 Veeboileri tasuvusaeg	41
4.2 Akusalvesti analüüs	42
4.2.1 Üles- ja allareguleerimise aktiveerimised	42
4.2.2 Akusalvesti üles- ja allareguleeritud energia	43
4.2.3 Akusalvesti üles- ja allareguleerimisest tulenev tulu	44
4.2.4 Akusalvesti tasuvusaeg	46
4.3 Õhksoojuspumba analüüs	47

4.3.1 Üles- ja allareguleerimiste aktiveerimiste arv	47
4.3.2 Õhksoojuspumba üles- ja allareguleeritud energia kogus.....	48
4.3.3 Õhksoojuspumba üles- ja allareguleerimisest tulenev tulu	49
4.3.4 Õhksoojuspumba tasuvusaeg.....	51
4.4 Reguleerimist vajavad hetked	52
5. PAINDLIKE SEADEMETE POTENTSIAAL EESTIS JA JÄRELDUSED	53
5.1.1 Veeboileri potentsiaal.....	53
5.1.2 Akusalvesti potentsiaal.....	54
5.1.3 Õhksoojuspumba potentsiaal	54
5.2 Järeldused.....	55
5.2.1 Paindlike seadmete aktiveerimised	55
5.2.2 Paindlike seadmete reguleeritud energia	56
5.2.3 Paindlike seadmete teenitav kasum	56
5.2.4 Paindlike seadmete plussid ja miinused	57
KOKKUVÕTE	60
SUMMARY.....	62
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	64

EESSÕNA

Täna enda juhendajaid Vahur Maask'i ja Freddy Plaum'i, tänu kellele sai käesolev magistr töö võimalikuks.

Lõputööga seotud võtmesõnad on paindlikud seadmed, agregator, bilansienergiaturg, magistr töö.

Lühendite ja tähiste loetelu

FRR – sageduse taastamise reserv,

RR – asendusreserv,

mFRR – manuaalselt aktiveeritav sageduse taastamise reserv,

aFRR - automaatselt aktiveeritav sageduse taastamise reserv,

$C_{\text{paindlikkus},T}$ - paindlikkuse hind,

C_{invest} - investeeringu kulud,

τ_{tasuvus} – tasuvusaeg,

C_{hooldus} – hooldus kulud,

$C_{\text{aktiveerimine}}$ – aktiveerimis kulud,

$C_{\text{amortisatsioon}}$ – seadme amortisatsiooni kulud,

$C_{\text{võrgutasu}}$ - lisatasu mida tuleb elektri tarbimisel tasuda,

$N_{\text{aktiveerimine}}$ - energia paindlikkuse aktiveerimiste arv vaadeldaval ajahetkel T,

$\Delta E_{\text{paindlikkus},T}$ - potentsiaalne paindlik energia,

$\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ - potentsiaalne paindlik võimsus,

$\Delta t_{\text{aktiivne}}$ - potentsiaalne koormuse aktiivne kestvus,

P_{max} – potentsiaalne maksimaalne võimsus,

n – seadmete arv,

P_n – seadme nimivõimsus.

SISSEJUHATUS

Arvestades elektrifitseerimise trendi, ennustatakse, et aastaks 2030 kasvab Eesti elektritarbimine 10 teravatt-tunnini (TWh). Aastal 2022 oli Eesti elektrienergia tarbimine 9,4 TWh [1]. Tulevikus lisab olukorrale survet elektriautode kasvav kasutamine, sest aastaks 2030 on transpordi CO₂ jalajälg peaaegu poole võrra vähenenud. Kiire elektritootmise ja -tarbimise lisandumine toob kaasa elektrihinna, pinge ja sageduse kõikumised. See viitab sellele, et elektrisüsteemi paindlikkus võib jõuda piirini [2].

Taastuenergia võib Eesti jaotusvõrgus tekitada ülepinge probleeme, mis omakorda võib suurendada kodude ja tööstuste energiakulu ning põhjustada seadmete rikkeid ja tõrkeid. Nende probleemide lahendamiseks on kaks võimalust: elektrivõrgu tugevdamine või paindlikkuse suurendamine [2].

Võrgu tugevdamine nõuab sageli kulukaid ümberehitustöid, sealhulgas kaablite, mastide ja alajaamade väljavahetamist. Tavaliselt peetakse odavamaks suurendada elektrisüsteemi paindlikkust tarbimise juhtimise kaudu. Näiteks võib koduste seadmete, hoonete kütmise, vee soojendamise ja elektritootmise juhtimine aidata olukorda parandada, vähendades nõudlust tipptundidel või suunates energiatarbimist ajavahemikele, mil võrgukoormus on madalam [2].

Selle töö eesmärk on pakkuda lugejale detailset ja informatiivset teavet koduste seadmete kasutamise kohta, et aidata tasakaalustada Eesti elektrivõrku ning arvestada paindlikkuse pakkumisega seotud oluliste teguritega. Lisaks keskendub töö agreggaatori rollile paindlikkuse pakkumisel, rõhutades tema tähtsust ja mõju. Lõpus antakse teavet selle kohta, kui tasuv võib olla kasutajal paindlikkuse pakkumine koduste seadmete abil.

Eesmärkide saavutamiseks kasutatakse paindlike seadmete koormusgraafiku põhjal simulatsioone, et saada ligilähedaselt realistlikke tulemusi. Simulatsioonid viiakse läbi *MATLAB*'i keskkonnas ning nende tulemused konverteeritakse *Excel*'i formaati, võimaldades autoril teha edasisi analüüse. *MATLAB*'i simulatsioonide aluseks on juhendajate poolt saadud andmed, mis hõlmavad terve aasta kohta minutipõhist täpsust.

Töö põhiosa keskendus bilansienergiaturu simulatsioonil, kus autor viis läbi põhjaliku analüüsi kolme seadme (veeboileri, õhksoojuspumba ja akusalvesti) kohta. Simulatsioonide eesmärk oli välja selgitada, kui sageli saab neid seadmeid reguleerida aasta jooksul. Lõpus teostati tasuvusanalüüs, mis põhines kolme aasta andmetel.

Lõputöö neljandas peatükis antaks ülevaade iga seadme tulemustest, hõlmates aktiveerimiste arvu aastate lõikes, reguleerimisel saavutatud energiakogust, rahavooge ning lõpuks tasuvusanalüüsi. Kõikide stsenaariumite kohta on esitatud detailsed graafikud ja tabelid. Peatüki lõpus analüüsib autor iga kolme seadme potentsiaali, arvutades välja nende potentsiaalse maksimaalse võimsuse, mida koduste seadmete abil oleks võimalik reguleerida. Viimases peatükis jagab autor soovitusi, mida tulevased paindlikkust pakkujad võiksid järgida, et aidata kaasa Eesti elektrivõrgu tasakaalustamisele.

1. ENERGIAPAINDLIKKUS

Antud peatükis antakse ülevaade energiapaindlikkuse tähendusest ja olulisusest, selgitatakse, millised seadmed on paindlikud ning arutletakse, kuidas neid paindlikke seadmeid saab agregeerida.

1.1 Energiapaindlikkuse ülevaade

Elektrisüsteemi energiapaindlikkus määrab ära, kui hästi suudab elektrisüsteem kohandada elektrienergia tootmist ja tarbimist vastavalt vajadustele, säilitades samal ajal süsteemi stabiilsuse. See tähendab, et süsteem suudab tagada pideva teenuse isegi kiirete ja suurte muutustega nii elektri pakkumises kui ka nõudluses [3].

Energiasüsteemid peavad pidevalt tasakaalustama energiapakkumist ja -nõudlust. Energiasüsteemi paindlikkus viitab sellele, kui suuteline see on reguleerima nii pakkumist kui ka nõudlust, tagamaks optimaalse energiatasakaalu. See võimaldab hoida energiavoogusid stabiilsemana [4].

Energiasüsteemi paindlikkus on energiasüsteemide projekteerimisel ja toimimisel loomulik omadus. Elektrisüsteemid on kavandatud nii, et tagada tootmise ja tarbimise tasakaal igal ajahetkel. Elektrisüsteemi paindlikkus näitab, kui hästi suudab süsteem kohandada elektrienergia tootmist ja tarbimist vastavalt vajadustele, tagamaks süsteemi stabiilsuse paindlikul viisil. Paindlikkus väljendab elektrisüsteemi võimet säilitada pidevat teenust kiirete ja suurte elektri pakkumise või nõudluse muutuste korral [3].

Paindlikkuse teenused hõlmavad "ülesreguleerimist", mis pakub lisatoodangut süsteemi tasakaalustamiseks, ning "allareguleerimist", mis vähendab energiatootmist. Reservid on vajalikud elektrisüsteemi stabiilsuse tagamiseks suurte komponentide väljalangemise korral [3].

Energiapaindlikkuse põhikomponendid on:

1) Varustus

Elektrijaamad on traditsiooniliselt olnud peamine allikas süsteemi paindlikkuse tagamisel. Paindlikkuse vajadust tagavad mitte ainult tavapärased elektritootmis viisid nagu kivisüsi, gaas, nafta, biogaas, koostootmine ja tuumaenergia, vaid ka

taastuenergiaallikate (*VRES - Variable renewable energy*) poolt pakutavat energiapaindlikkust [3].

2) Nõudlus

Nõudluse juhtimise programmid kasutavad ära uusi kommunikatsiooni- ja juhtimisvõimalusi. Sellised võimalused hõlmavad nõudluse juhtimist elektrisektoris (nt energiamahukad tööstusharud, teenused ja nutikad rakendused) ning võimalusi, mis tulenevad teiste sektorite elektrifitseerimisest, nagu elektriautod, soojuspumbad ja vesiküte [3].

3) Võrk

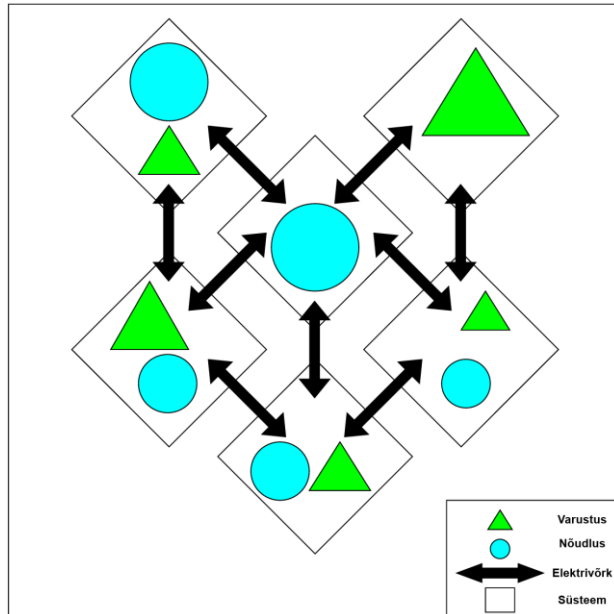
Elektrisüsteemi jaotus- ja ülekandevõrgud on süsteemi paindlikkuse võtmekomponendid, mis võimaldavad paindlikkuse ressursside jaotamist. Võrgustiku tugevdamine ja ülekoormuse leevendamine aitab efektiivselt hallata taastuenergiaallikate varieeruvust, kuna see tasakaalustab sageli tootmise muutusi suuremates geograafilistes piirkondades. Peamised võimalused hõlmavad võrguliinide läbilaskevõime suurendamist ja võrgu kasutatavuse parandamist elektrivoo juhtimisseadmete lisamise kaudu, nagu faasi muutvad trafod, *FACTS*-seadmed ja *HVDC*-liinid [3].

4) Elektrisüsteem

Elektrisüsteemi töökindluse parandamine võib olla äärmiselt kasulik taastuenergiaallikate paremaks integreerimiseks ja süsteemi paindlikkuse ressursside vabastamiseks. Peamised võimalused hõlmavad turureeglite kohandamist (nt varasemate sulgemisaegade kehtestamine) ja turu ning kontrollitsoonide laiendamist, mis omakorda võimaldab efektiivselt vahendada taastuenergiaallikate varieeruvust läbi nende ruumilise koondumise [3].

Need komponendid moodustavad koos energiasüsteemi, kus elektrienergia varustamine toimub erinevate tootmisallikate kaudu [5].

Joonis 1.1 kirjeldab skeemi, kus kõik neli põhikomponenti on näidatud ning nende rolli elektrisüsteemis.



Joonis 1.1 Paindlikkuse põhikomponendid ning nende vastastikune mõju [5]

1.2 Paindlikud seadmed

Tänapäeval kasvab elektrinõudlus ja taastuenergia, eriti päikese- ja tuuleenergia, osakaal pidevalt. See seab elektrivõrgule suurema väljakutse: kuidas tagada pakkumise ja nõudluse vaheline reaajas tasakaal. Õnneks on nutikad sensorid, mõõteseadmed ning energiasalvestustehnoloogiad oluliselt arenenud. Nende abil on võimalik juhtida elamute nõudlust, mis omakorda aitab võrgul parandada stabiilsust ja optimeerida paindlikke koormusi [6].

Üks sektor, mille potentsiaali saab nõudluse paindlikkuse suurendamiseks ära kasutada, on elamuehitussektor. Sidetehnoloogia areng ja elamute kütte elektrifitseerimine võivad selle sektori innovatiivset kasutamist oluliselt soodustada, arvestades, et hoonete ehitus ja käitamine moodustavad ligikaudu 40% ülemaailmsest energiatarbimisest [7].

Hoone energiapaindlikkus võimaldab juhtida nõudlust ja tootmist vastavalt kohalikele kliimatingimustele, kasutajate vajadustele ja võrgunõuetele, millel võib olla märkimisväärne mõju elektrisüsteemi üldisele paindlikkusele [7].

Hoonete energiatõhususe edendamine on oluline, kuid sama tähtis on ka energiapaindlikkuse tagamine nõudluse ja pakkumise tasakaalu optimeerimiseks. Tegelikult määratletakse energiapaindlik hoone kui see, mis suudab kavandatult kohandada oma energianõudlust ja -tarbimist, sealhulgas elektri- ja soojusenergia kasutust, säilitades samal ajal lõppkasutajate mugavuse ja vajadused [8].

Käesolevas lõputöös käsitletakse kolme tüüpi paindlikke seadmeid, mille kohta teostatakse simulatsioone ja analüüsi töö edasises käigus. Antud seadmed on:

1. Soojuspumbad

Hoonete kütmiseks ja mõnikord ka jahutamiseks kasutatakse õhu või maa loomulikku soojusenergiat. Soojuspumpade paindlikkusvõimaluste hulka kuulub võime pump välja lülitada teatud punktides, olgu siis manuaalse või automaatse protsessi abil [9].

Paljud kodud võivad soojuspumba välja lülitada umbes kaheks tunniks, ilma et see mõjutaks oluliselt nende mugavust. See võib oluliselt aidata tasandada talvise õhtuse tipptarbeperioodi (umbes kolm tundi) [10].

Soojuspumbad lülitatakse ajutiselt üles või alla ning selle aja jooksul hoitakse sisetemperatuurid stabiilsena, kasutades hoone soojuslikku inertsit või spetsiaalset soojussalvestit [10].

2. Kütte seadmed

Nagu soojuspumbad, mis suudavad hooned kas kuumutada või jahutada ning mida saab teatud hetkedel välja lülitada, kasutades selleks kas manuaalset või automaatset protsessi [9].

Veesoojendid salvestavad soojust, võimaldades nende elektrinõudlust muuta ilma tarbija mugavust mõjutamata. Selline paindlikkus nõudluses võib olla peamine võrguressurss, aidates vähendada tippnõudlust, elektrikulusid ja parandada süsteemi töökindlust ning võimaldades paremat katkendliku taastuenergia kasutamist [11].

Siiski eeldab elektriliste veesoojendite tõhus kasutamine nõudluse paindlikkuse tagamiseks, et need oleksid varustatud vajalike juhtimisseadmetega [11].

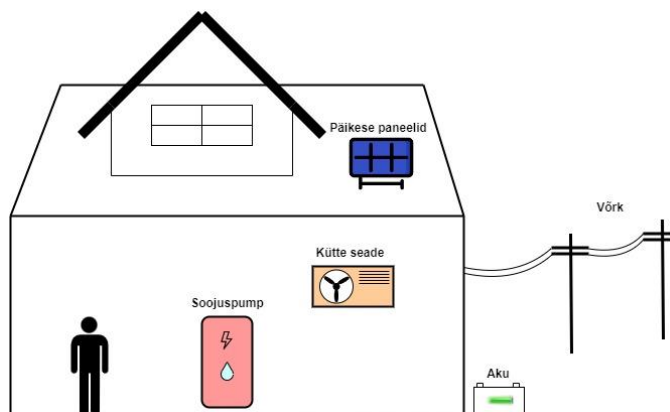
3. Akusalvestid

Akud on äärmiselt kasulikud kohtades, kus kasutatakse päikese- või tuuleenergiat, võimaldades omanikel salvestada energiat aegadel, mil päike ei paista ega tuul ei puhu. Taastuvelektri salvestamine akude abil mängib olulist rolli katkendlike taastuvate energiaallikate laialdasema kasutamise võimaldamisel. See omakorda on oluline samm fossiilkütustelt taastuvatele energiaallikatele üleminekul [9].

Akudega varustatud hooned saavad akusid laadida odavama elektri ajal, mis võimaldab neil vältida kalli elektri ostmist tipptundidel. Lisaks sellele, et akude salvestamine vähendab hoone energiakulusid, võimaldab see ka täiendavat tulu teenimist. Näiteks

saavad hooned müüa salvestatud elektrienergiat tagasi võrku kõrgete elektrihindade ajal, kui nõudlus on suur [9].

Joonis 1.2 kirjeldab, kuidas paindlikud seadmed ühes majapidamises on jaotatud.



Joonis 1.2 Paindlikud seadmed kodumajapidamises [6]

1.3 Paindlike seadmete agregeeritud juhtimine

Euroopas on peamiselt suured elektritarbijad tegutsenud nõudluse reageerimise teenuse pakkujatena elektriturul. Need suured elektritarbijad, kes ei suuda vastata vastavate turgude nõuetele (nt kättesaadavuse või usaldusväärsuse osas), jäävad turust välja. Paindlikkuse pakkumiseks turgudel tuleb neid agregeerida. Samuti tuleb väiksemad elektritarbijad, nagu kodumajapidamised või kaubandusrajatised, agregeerida, kuna nende poolt pakutav võimsus ja/või energiaühikute arv on liiga väike, et nendega elektriturul kaubelda [14].

Mitu tehnoloogiat võib pakkuda mitmekesisust: hajutatud tootmine, nõudluse kaasamine ja energia salvestamine. Ent ainult suurte tarbijate, näiteks tööstusklientide jaoks, on lihtne müüa paindlikkust individuaalselt ning osaleda paindlikkuse turul. Väiksematel kodu- ja äriklientidel võib olla olulisi takistusi nende turgudele ligipääsemisel, kuna tehingukulud seotud osalemisega on liiga suured, kui neid haldab individuaalne tasand [13].

Agregeerimine võimaldab väiksematel kodu- ja äriklientidel maksimaalselt rakendada nende paindlikkuse potentsiaali. See on ärifunktsioon, kus ühendatakse tootmist ja/või tarbimist, et pakkuda energiat ja teenuseid süsteemi osalejatele. Agregeerijad saavad olla jaemüüjad või kolmandad isikud, kes toimivad vahendajatena klientide ja paindlikkuse pakkujate vahel. Nende ülesanne on tuvastada ja koguda klientide paindlikkust ning hõlbustada nende ühist osalemist turul [13].

Põhiidee seisneb selles, et agregaatoreil lastakse juhtida paindlike seadmete, näiteks kütte- ja jahutusseadmete portfelli. Selle lähenemisega saab agregaatoreid toimida virtuaalse elektriijaamana ja kasutada elektriturgudel kogunenud paindlikkust samadel tingimustel nagu tavalised generaatorid. Agregaatoreil elektriturul osalemiseks on võtmetähtsusega võime juhtida mitmeid seadmeid nii, et nende kogutarbimine vastaks võrdlusvõimsusele. [12].

1.3.1 Agregaatorei funktsionaalsus

Agregaatoreid võib funktsionaalsuse poolest võrrelda just kui vahendajafirma. Üldiselt toimivad vahendajafirmad kolmandate osapooltena ostjate ja müüjate vahel [14]. Järgnevalt esitatakse ära kõik funktsioonid, mida agregaatoreid peab täitma, et tagada energiapaindlikkuse agregeerimist.

- a) Andmehaldus - Elektrisektoris peaks agregaatoreil olema ülevaade paindlikkust pakkuvate osapoolte koormustest. Näiteks on oluline, et nad suudaksid prognoosida oma klientide energianõudlust, paindlikkuse turuväärtusi, teenuste mahtu ning usaldusväärset. Lisaks peaksid nad olema kursis erinevate paindlikkusteenuste hindadega turul ja võimalike hinnamuutustega. Andmete haldamine on oluline agregaatorei jaoks kasumlike otsuste tegemisel [14].
- b) Teenuse komplekteerimine - Agregaatoreid saab turul paindlikkuse eest väärtust tänu sellele, et ta pakub mitmeid individuaalseid paindlikkusteenuseid, mis koondatakse kaubeldavateks väärtusteks. Selle aluseks on tehnilised andmed ja paindlikkusteenuste omadused, nagu kättesaadavus, võimsus, aeglane ja kiire ülemineku teenused ning kestvus. Paindlikkus aktiveeritakse vastavalt turu vajadustele, kasutades IT-kommunikatsiooni ja -juhtimist, et tagada töökindlus ja jälgimine [14].
- c) Sobitamine - Vahendav ettevõtte teeb elektriturul pakkumisi komplekssetele teenustele, mis võivad hõlmata erinevaid turge. Need turud võivad olla võimsusega seotud, näiteks tasakaalustamis- ja reservturgudel, või hoopis energiapõhised, nagu päev-päeva järgsed või pikaajalised lepingud [14].
- d) Tehingu tagamine - Elektrisektoris peavad agregaatoreid pakkuma põhivõrguettevõtjatele usaldusväärseid paindlikkusteenuseid. Agregaatoreid võtavad enda kanda nõudlusele reageerimise tarnimisega seotud riskid ning peaksid seetõttu teostama järelkontrolli, et tagada nõudlusele vastavus [14].

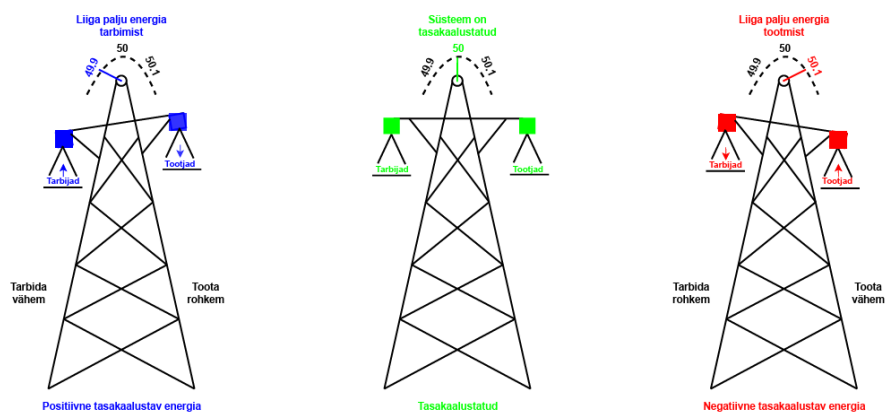
2. PAINDLIKKUSTEENUSED JA PAINDLIKE SEADEMETE HINNASTAMISMUDELID

Selles peatükis vaadeldakse bilansiturul toimuvat, selle tähtsust ja mõju. Samuti analüüsitakse põgusalt erinevaid aktiveerimismeetodeid ning nende kasutamist praegusel ajal Eestis (ja teistes Balti riikides).

2.1 Tasakaalustamisteenused

Tasakaalustamisteenused on olulised lühiajalised lahendused elektrivõrgu sagedushälvete reguleerimiseks. Need teenused, tuntud ka kui kontrollreserv, on üks olulisi komponente süsteemihaldurite jaoks, kuna see tagab elektrivarustuse turvalisuse. Tasakaalustavate teenuste hulka kuuluvad tasakaalustav energia ja tasakaalustav võimsus. Tasakaalustav energia võimaldab süsteemihalduritel hoida sagedust stabiilsena, samas kui tasakaalustav võimsus viitab teenusepakkujate paindlikkusele pakkuda vajalikku energiat määratud ajavahemiku jooksul [15].

Elektrivõrgu sujuva toimimise tagamiseks on oluline säilitada selle sagedus konkreetsetes piirides - tavaliselt 50 või 60 Hz. Sageduse kõrvalekalle sõltub otseselt elektrienergia tarbimise ja tootmise tasakaalust. Ületootmise korral (või tarbimise vähenemisel) tõuseb sagedus, samas kui alatootmise korral (või liigse tarbimise ajal) sagedus langeb. Kui sagedus ületab teatud piirväärtust ($\pm 0,2$ Hz), võib tekkida elektrikatkestus. Süsteemihaldurid (Euroopas tuntud kui põhivõrguettevõtjad) kasutavad selliste olukordade vältimiseks tasakaalustavat energiat. See tasakaalustav energia võimaldab võrgul energiat kas tarbida või toota, kui sagedus kaldub stabiilsest tasemest liiga kaugemale [15]. Joonis 2.1 kirjeldab täpsemalt tasakaalustava energia tööpõhimõtet.



Joonis 2.1 Tasakaalustava energia tööpõhimõte [16]

2.1.1 Bilansienergiaturg

Hetkel Euroopas on bilansienergiaturul neli tasakaalustavat teenust, mis erinevad üksteisest reageerimisaja ja aktiveerimismeetodi poolest. Kõik neli teenust on nimetatud allpool järgnevalt:

a) **Sageduse hoidmise reserv** - FCR (*Frequency Containment Reserve*)

Tuntud ka kui primaarreserv. Primaarreservi kasutatakse võrgu kiireks stabiliseerimiseks 30 sekundi jooksul, aktiveerudes automaatselt elektrijaama generaatoris. Esmast reservi kasutatakse ainult esmaseks stabiliseerimiseks ning seda täiendatakse sekundaarse juhtimisega niipea kui võimalik, et FCR saaks valmistuda järgmiseks aktiveerimiseks [16].

b) **Automaatne sagedusreserv** – aFRR (*Automatic frequency restoration reserve*)

Tuntud ka kui sekundaarreserv, see peab olema aktiveeritud kas 7,5 või 5 minuti jooksul, sõltuvalt riigist. Oluline nõue on, et need suudaksid nõutud aja jooksul täielikult aktiveeruda. aFRRi peamine eesmärk on asendada FCR'i. aFRR-i eesmärk on kiiresti taastada võrgu sagedus pärast häiret normaalsele töötasemele. Võrgu sagedus on süsteemi stabiilsuse näitaja ning on oluline hoida seda teatavas vahemikus, et tagada võrgu ohutu ja tõhus toimimine [16].

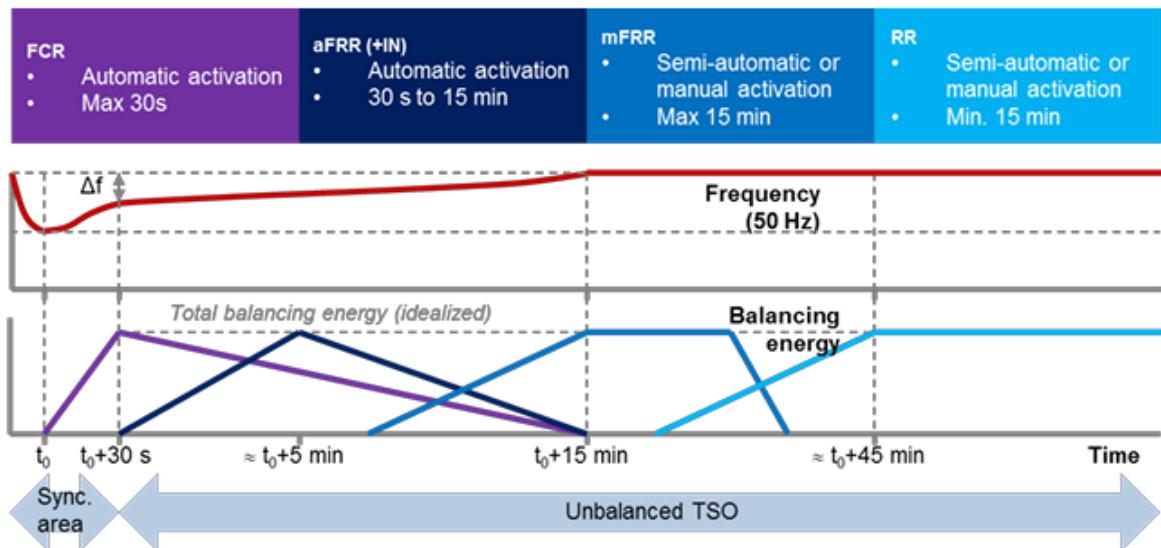
c) **Manuaalne sagedusreserv** - mFRR (*Manual frequency restoration reserve*)

Tuntud ka kui tertsiaalreserv, seadmed, mis töötavad mFRR-iga, peavad olema aktiveeritud 15 või 12,5 minuti jooksul, sõltuvalt kohalikest õigusaktidest. Neid seadmeid aktiveeritakse käsitsi, mis tähendab, et dispetšer teavitab seadme operaatorit seadme aktiveerimise vajadusest kindlal ajal. Kui sagedus on taastatud, deaktiveeritakse mFRR-i ressursid ja taastatakse nende tavapärase tööolek [16].

d) **Asendusreserv** – RR (*Replacement reserve*)

Kvaternaarreserv on pikaajaline reserv, mis vabastab eelnevate reservide võimsuse pärast aktiveerimist. See võimaldab reageerida hilisematele riketele või häiretele elektrisüsteemis kiirema reserviga. Aktiveerimine toimub automaatselt või poolautomaatselt ning reserv peab olema aktiivne 15 minutist kuni 2 tunnini [17].

Joonis 2.2 kirjeldab bilansienergiaturgu, kus on toodud välja kõik reservid aktiveerimisaegadega.



Joonis 2.2 Bilansienergiaturu kõik neli teenust koos reageerimisaegadega [19]

2.1.2 Baltimaade kasutatav bilansienergiaturu teenus

Tasakaalustamine hõlmab tegevusi ja protsesse, mille eesmärk on tagada elektrisüsteemi stabiilsus, sh sageduse hoidmine vajalikus vahemikus ning reserve kvaliteedi tagamine vastavalt nõuetele [19].

Euroopa õigusaktid seab detailseid juhiseid tasakaalustavate energiaturgude integreerimiseks, mille eesmärk on soodustada konkurentsi, mittediskrimineerimist, läbipaistvust ja elektrienergia valdkonna integratsiooni, parandades seeläbi Euroopa tasakaalustamissüsteemi efektiivsust ja varustuskindlust [19].

- **PICASSO**

Selle platvormi peamiseks eesmärgiks on põhivõrguettevõtjate vaheline teabevahetus, mille abil on võimalik olemasolevaid elektrivarusid automaatselt aktiveerida, et taastada süsteemi nominaalsagedus. See platvorm võimaldab vahetada tasakaalustavat energiat alternatiivse sageduse taastamise reservist (aFRR), mille aktiveerimisaeg on vahemikus 30 sekundist kuni 15 minutini. Eesti osaleb selle platvormi vaatleja riigina [19].

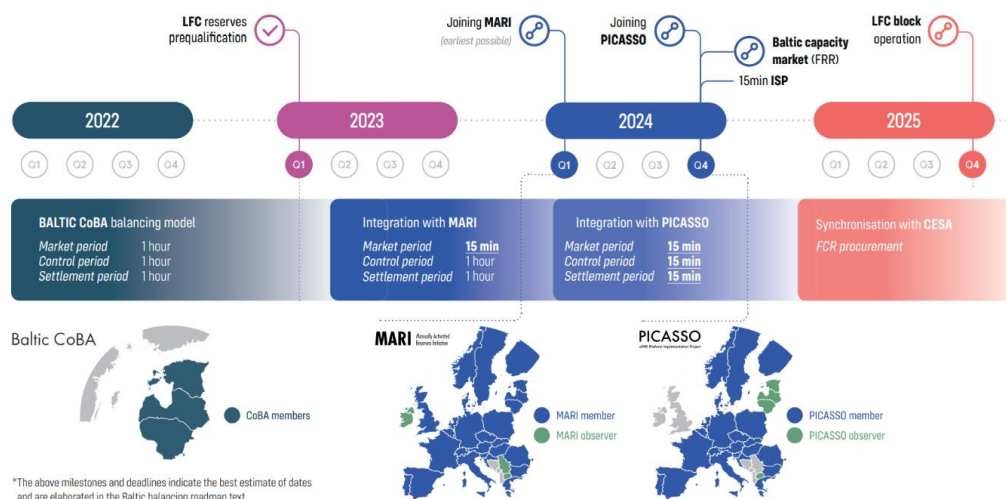
- **MARI**

Selle platvormi põhieesmärk on võimaldada põhivõrguettevõtjatel vahetada käitsi aktiveerimisi, et taastada süsteemisagedus nominaalsagedusele. Reguleerimisvaldkonnas peaksid kõik põhivõrguettevõtjad seda platvormi rakendama. Platvormi aktiveerimise aeg on alla 15 minuti. Eesti osaleb selle platvormi liikmena [19].

- **TERRE**

Selle platvormi peamiseks eesmärgiks on pöhvõrguettevõtjate vaheline teabevahetus seoses generaatorite reserve aktiveerimise, salvestamise ja nõudluse reageerimisega. RR-teenuse aktiveerimise aeg selles platvormis ulatub kuni 45 minutini. Praegusel hetkel pole Eesti seotud selle platvormiga [19].

Joonis 2.3 kirjeldab kõigi platvormide asetust aastate lõikes.



Joonis 2.3 Balti tasakaalustamise teekaart [21]

Eesti süsteemihaldur Elering kasutab reaajas Eesti elektrisüsteemi bilansi tasakaalustamiseks reguleerimisreservide ja avariireervõimsuste aktiveerimist. Vastava reservvõimsuse puhul on tegemist "käsitsi aktiveeritav sageduse taastamise reserv - mFRR" (*manually activated frequency restoration reserve*) [18].

Elering ei soeta ega aktiveeri teisi reservvõimsuste tüüpe nagu automaatselt aktiveeritav "sageduse hoidmise reserv" (*frequency containment reserve*), automaatselt aktiveeritav sageduse taastamise reserv (*automatically activated frequency restoration reserve*) või "asendusreserv" (*replacement reserve*) elektrisüsteemi normaaltalitluse tagamiseks. [18].

Balti elektrisüsteemis pakutakse peamist tasakaalustamisteenust manuaalse sageduse taastamise reservi (mFRR) kaudu. See teenus hõlmab paindlikku koormust, mis peab suutma reageerida ja üleminek ühe võimsustasemelt teisele toimub 12.5-minutilise ajaga [17].

Tabel 2.1. on toodud välja mFRR, aFRR ja RR kõige olulisemad parameetrid, mida tuleb bilansiturul järgida.

Tabel 2.1 Teenuse aFRR, mFRR ja RR parameetrid [20]

Teenus	aFRR	mFRR	RR
Aktiveerimise viis	Automaatne	Manuaalne	Manuaalne
Aktiveerimise tüüp	Otsene	Otsene või plaaniline	Plaaniline
Täielik aktiveerimise aeg	5 minutit	12,5 minutit	30 minutit
Minimaalne kogus	1 MW	1 MW	1 MW
Energia turg	PICASSO	MARI	TERRE

2.2 Hinnastamismudel

Hinnastamismudeli eesmärk on tagada, et teenusepakkuja pakutav paindlikkusteenus ei tohi põhjustada puhaskahjumit, isegi kui see võib tuua kasumit või mitte. Seepärast ei võeta paindlikkuse hinnastamismudeli puhul arvesse tegelikku kasumit ja püütakse arvestada ainult teenuse pakkumise tasuvuskulusid [22].

Paindlikkuse hinnastamismudel on mehhanism, mis määrab kindlaks miinimumhinna, mida tuleb tarbijale maksta kohaliku paindlikkusturu teenuste eest [22].

Allpool on esitatud neli põhiparameetrit, mille alusel määratakse paindlike seadmete aktiveerimine hinnakujundusmudelis.

- **Paindliku võimsuse olemasolu** - Paindlikke seadmeid kasutatakse tavaliselt siis, kui nende kasutamine võimaldab piisavalt võimsust muutmiseks. Olgu näiteks vajadus vähendada energiatarbimist ning kui paindlikud seadmed töötavad juba miinimumtaseme lähedal, siis neid tihti ignoreeritakse [17].
- **Reguleerimise kestvus** - Paindlikud seadmed võivad töötada teatud aja jooksul. Kui lubatud kestus on juba lühike, pole mõistlik neid paindlikke seadmeid reguleerimiseks valida. Seda aspekti ei võeta arvesse enne, kui lubatud kestus on pikem [17].
- **Reguleerimise hind** - Iga paindliku seadme käitaja või omanik määrab ise oma reguleerimishinna. Kui nõutav hind ületab agregaatori valmisolekut maksta, siis jääb antud paindlik seade reguleerimisest kõrvale. Aktiveerimise eest teenitud tulu arvutamisel kasutatakse 2023. aasta tasakaalustava energia hindasid. Pakutud hind makstakse paindliku seadme omanikule ning tasakaalustava energia hinna ja pakutud hinna vahe jagatakse süsteemi omaniku ja agregaatori vahel. Tavaolukorras tarbitud energia maksumuse arvutamiseks kasutatakse *Baltic Transparency Dashboard* päevast hinda Eestis. [17].

- **Aktiveerimine** - See märgib hetke, mil reserv aktiveeritakse, tähendades paindlike seadmete energiatarbimise muutust. Simulatsioonides, mis hõlmavad olemasolevat paindlikku võimsust, reguleerimise kestvust ja hinda, kasutatakse mFRR'i standardtoote 2023. aasta aktiveerimisi [17].

Käesolev lõputöö tutvustab hinnastamismudelit, mis võimaldab energiapaindlikkuse kulusid arvutada lähtuvalt nende reaalsele kasutusele. Selline lähenemine pakub tööstustarbijatele detailset hinnainformatsiooni, aidates seeläbi kaasa energiahalduse optimeerimisele ja energiakulude vähendamisele. Lisaks esitatakse lõputöös kaks keskselt valemit (2.1) ja (2.2), mis moodustavadki hinnastamismudeli. Samuti on defineeritud kõik vajalikud parameetrid [23].

$$C_{\text{paindlikkus},T} = \frac{\frac{C_{\text{invest}}}{\tau_{\text{tasuvus}}} + C_{\text{hooldus},T} + C_{\text{aktiveerimine}} \cdot N_{\text{aktiveerimine},T} + C_{\text{amort}} + C_{\text{võrgutasu}}}{\Delta E_{\text{paindlikkus},T}} \quad (2.1)$$

$$\Delta E_{\text{paindlikkus},T} = \Delta P_{\text{paindlikkus},T} \cdot \Delta t_{\text{aktiivne}} \cdot N_{\text{aktiveerimine},T} \quad (2.2)$$

Kus:

$C_{\text{paindlikkus},T}$ – paindlikkuse hind,

C_{invest} – investeeringu kulud,

τ_{tasuvus} – tasuvusaeg,

$C_{\text{hooldus},T}$ – hooldus kulud,

$C_{\text{aktiveerimine}}$ – aktiveerimis kulud,

$C_{\text{amortisatsioon}}$ – seadme amortisatsiooni kulud,

$C_{\text{võrgutasu}}$ – lisatasu mida tuleb elektri tarbimisel tasuda. Võrgutasu rakendub seadmete sisselülitamise käigus ning ei rakendu kui seadmed välja lülitatakse

$N_{\text{aktiveerimine},T}$ - energia paindlikkuse aktiveerimiste arv vaadeldaval ajahetkel T. Käesolevas töös on üks aktiveerimine tunnis, ehk siis $N_{\text{aktiveerimine},T} = 1$.

$\Delta E_{\text{paindlikkus},T}$ - potentsiaalne paindlik energia,

$\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ - potentsiaalne paindlik võimsus,

$\Delta t_{\text{aktiivne}}$ – potentsiaalne koormuse aktiivne kestvus [23].

Kõik kulud seadmete jaoks, mis on vajalikud paindliku hinnastamismudeli arvutamiseks, on eraldi alapeatükkides välja toodud iga seadme kohta.

2.2.1 Õhksoojuspumba hinnakujundus

Arvestades, et õhksoojuspumbad on levinud enamikus kodudes, on oluline mõelda, kuidas mõõta ja juhtida nende võimsust. Paindlikkuse teenuse pakkumise aluseks on just selle võimsuse täpne mõõtmine, mida tehakse releede abil. Lisaks on võimsuse juhtimise võimaldamiseks hädavajalik kaasata investeringusse juhtimisese. Kuna elektritööd nõuavad erialaseid oskusi, arvutatakse kuludesse ka elektrikü tunnihind, mis hõlmab relee paigaldust, et ühendada see õhksoojuspumbaga. Paigaldusele kuluva aja arvestuslikuks kestuseks on määratud üks tund. Kuna iga seade ja sellega seotud tööd on hinnastatud eraldi. Tabel 2.2. on toodud välja kõik maksumused.

Selle lõputöö raames on teadlikult jäetud mainimata spetsiifiliste seadmete ja neid paigaldavate elektritettevõtete nimed, et säilitada anonüümsust. On oluline rõhutada, et kõik siin toodud hinnangud seadmete maksumusele on üldistavad, kuna hinnad turul muutuvad pidevalt ja tegelikud kulud võivad esialgsetest arvutustest erineda.

Tabel 2.2 Õhksoojuspumba paindlikkusteenusesse integreerimise kuluread

Nimetus	Maksumus, €
Relee	20
Juhtseade	100
Paigaldustööd	100

Tabel 2.3. on toodud välja õhksoojuspumba kulud, kuna teada on investeringu suurus.

Tabel 2.3 Hinnastamismudeli parameetrite väärtused

Parameeter	Väärtus	Kirjeldus
$C_{investeering}$	220 €	Tabel 2.2 kohaselt on investeringu kogumaksumus 220 €
$C_{hooldus,T}$	0 €	Soojuspumpade keskmine eluiga on vähemalt 10 aastat, eeldusel, et neid hooldatakse korrapäraselt igal aastal. Kuna õhksoojuspumpadele tehakse niikuinii iga-aastast hooldust, sõltumata sellest, kas seadmeid on vahepeal sisse-välja lülitatud, ei nõua iga lülitus eraldi hooldust. Seetõttu piirdub hooldus planeeritud rutiinsete ülevaatustega, mis tähendab, et hoolduskulud ($C_{hooldus,T}$) on praktiliselt olematud.
$C_{aktiveerimine}$	0 €	Kuna temperatuur hoitakse mugavustsoonis ega kõigu sellest välja, ei ole vaja arvestada aktiveerimishindadega
$C_{amortisatsioon}$	0 €	Õhksoojuspumba puhul ei põhjusta seadme sisse- ja väljalülitamine otseselt märkimisväärset kulumist, mistõttu loetakse amortisatsiooni kulu 0 €-ks.
$C_{võrgutasu}$	60,4 € /MWh	Elektri edastamise eest tasumisele kuuluv summa on võrgutasu, mis on määratletud Elektrilevi hinnakirjas. Hind sisaldab käibemaksu [24].
$\tau_{tasuvus}$	10 aastat	Paindlikkuse pakkujate oodatav tasuvusaeg seadmele

2.2.2 Veeboileri hinnakujundus

Veeboilerite laialdane kasutus enamikes kodudes rõhutab vajadust nende võimsuse täpse mõõtmise ja juhtimise järele. Sarnaselt õhksoojuspumpadele põhineb paindlikkuse teenus just nimelt võimsuse mõõtmisel, mida teostatakse releede abil. Võimsuse efektiivseks juhtimiseks on oluline investeerida juhtimisseadmesse. Kuna elektritööd eeldavad spetsiifilisi oskusi, lisandub kuludele ka elektrikü tunnihind, mis katab rele paigalduse veeboileri süsteemi. Paigalduse eeldatav kestvus on üks tund. Tabel 2.4 kirjeldab detailset kuluarvestust, mis hõlmab igat seadet ja sellega kaasnevat töid.

Nagu varem õhksoojuspumba puhul, jätab autor nimetamata konkreetse seadme või elektrifirma, et tagada anonüümsus. Kõik hinnangud on esitatud ligikaudses suurusjärgus ja ümardatud ülespoole.

Tabel 2.4 Veeboileri investeeringu kuluread

Nimetus	Maksumus, €
Relee	20
Juhtseade	160
Elektriku tunnihind	50

Teades kõikide seadmete hindasid, on võimalik esitada tabel, mis kajastab kõiki kulusid, mida hinnastamismudel peab arvesse võtma. Tabel 2.5 kirjeldab veeboileri kulusid.

Tabel 2.5 Hinnastamismudeli parameetrite väärtused

Parameeter	Väärtus	Kirjeldus
C_{invest}	230 €	Tabel 2.4 kohaselt on investeeringu kogumaksumus 230 €
$C_{hooldus,T}$	0 €	Veeboilerite keskmine eluiga on vähemalt 10 aastat, eeldusel, et neid hooldatakse korrapäraselt igal aastal. Kuna veeboilerile tehakse niikuinii iga-aastast hooldust, sõltumata sellest, kas seadmeid on vahepeal sisse-välja lülitatud, ei nõua iga lülitus eraldi hooldust. Seetõttu piirdub hooldus planeeritud rutiinsete ülevaatustega, mis tähendab, et hoolduskulud ($C_{hooldus,T}$) on praktiliselt olematud.
$C_{aktiveerimine}$	0 €	Kuna temperatuur hoitakse mugavustsoonis ega kõigu sellest välja, ei ole vaja arvestada aktiveerimishindadega
$C_{amortisatsioon}$	0 €	Veeboileri puhul ei põhjusta seadme sisse- ja väljalülitamine otseselt märkimisväärset kulumist, mistõttu loetakse amortisatsiooni kulu 0 €-ks.
$C_{võrgutasu}$	60,4 € /MWh	Elektri edastamise eest tasumisele kuuluv summa on võrgutasu, mis on määratletud Elektrilevi hinnakirjas. Hind sisaldab käibemaksu [24].
$\tau_{tasuvus}$	5 aastat	Paindlikkuse pakujate oodatav tasuvusaeg seadmele

2.2.3 Akusalvesti hinnakujundus

Kuna enamikul majapidamistel ei ole akusalvestit, on oluline arvestada selle lisamisega investeeringukulude hulka. Lisaks on äärmiselt oluline kaaluda nutika juhtseadme lisamist koos inverteriga investeeringusse, et võimaldada võimsuse juhtimist ja elektri tarbimist sobivatel aegadel, mis on kasulik tarbijale.

Lõputöö raames oletatakse, et akud laetakse täis päikesepaneelide toodetud energia abil. Kuna koguaeg ei ole päikest ja ei suudeta toota energiat paneelide abil, tähendab see seda, et akusalvestit on võimalik laadida odavamate tundide ajal võrgu kaudu. Peale aku tühjendamist toimub 1 tsükkel ja hakkab korduma järgmine tsükkel. Akusalvesti nimivõimsuseks valiti 5 kW ning energia mahutavuseks 13,5 kWh.

Lisaks on väga oluline võimsuse juhtimine paindlikkusteenuste osutamisel. Selleks tuleb investeeringukuludesse arvestada ka nutikas juhtseade.

Nagu varem õhksoojuspumba ja veeboileri puhul, jätab autor nimetamata konkreetse seadme või elektrifirma, et tagada anonüümsus. Kõik hinnangud on esitatud ligikaudses suurusjärgus ja ümardatud ülespoole. Tabel 2.6 on toodud välja iga seadme maksumuse suurusjärgud.

Tabel 2.6 Akusalvesti investeeringu kuluread

Seade	Maksumus, €
Akusalvesti	2550
Inverter	1540
Juhtseade koos mõõtmisega	360
Elektriku tunnihind	50

Teades kõikide seadmete hindasid, on võimalik esitada tabel, mis kajastab kõiki kulusid, mida hinnastamismudel peab arvesse võtma. Tabel 2.7. on toodud välja akusalvesti kogukulud.

Tabel 2.7 Hinnastamismudeli parameetrite väärtused

Parameeter	Väärtus	Kirjeldus
$C_{investeering}$	4500 €	Tabel 2.6 kohaselt on investeeringu kogumaksumus 4500 €
$C_{hooldus,T}$	0 €	Kuna see on liitumioonaku, on seadme hooldusvajadus minimaalne. Üldiselt garantii perioodi jooksul ei ole vaja teostada lisahooldusi.
$C_{aktiveerimine}$	0 €	Eeldades, et akusalvesti laadimine toimub päikesepaneelidest saadud energiaga, pole kasutajal vajadust maksta lisatasusid iga kord, kui seadet aktiveeritakse.
$C_{amortisatsioon}$	0 €	Tootja andmetel on aku eluiga hinnatud 6000 tsüklile. Eeldades, et aku läbib iga päev ühe tsükli, ulatuks selle kasutusiga ligikaudu 16 aastani. Seega on aku amortisatsioonikulu nii marginaalne, et seda praktiliselt ei pea arvestama.
$C_{võrgutasu}$	60,4 €/MWh	Elektrienergia soetamine ja salvestamine odava hinna perioodil ning selle müümine tiptunni hindadega, teisisõnu energiaarbitraaž. Täieliku laadimistsükli käigus kehtib võrgutasu, mis on sätestatud Elektrilevi hinnakirjas ja sisaldab käibemaksu [24].
$\tau_{tasuvus}$	12 aastat	Paindlikkuse pakujate jaoks on seadme tasuvusaja ootus oluline. Päikesepatarei tasuvusaeg ületab tavaliselt aku garantii kehtivusaja. Enamasti on aku tasuvusaeg 12 aastat, samas kui enamikul akudel on 10-aastane tootegarantii [25].

2.3 Üles- ja allareguleerimine

Järgnevas peatükis näidatakse ära, mismoodi kujuneb hinnastamismudelis arvutus metoodika, juhul kui seade lülitatakse sisse või välja. Ehk siis kuidas see mõjutab hinda. Antud teema on oluline, kuna paindlikkust pakuvad tarbijad saavad hinnastamismudeli arvutuste põhjal teha teadlikke valikuid, millal seadet sisse või välja lülitada, tagamaks optimaalset paindlikkusteenust võrgus.

Paindliku võimsuse hindamine toimub iga ajahetke puhul, võttes arvesse süsteemi energiatarbimise piirangud – nii maksimaalse kui ka minimaalse. Selle alusel arvutatakse nii allareguleerimise kui ka ülesreguleerimise võimsus, kasutades tunnipõhist energiakasutuse prognoosi. Reguleerimise suuna määrab väärtuse eelnev märk (+ või -) [17].

Võimsuse muutus igal ajahetkel (t) arvutatakse prognoositava tarbimise ning süsteemi energiakasutuse maksimumi ja miinimumi alusel. Süsteemi paindlikkuse saavutamiseks võib minimaalne tarbimine olla null, eeldades võimalikku süsteemi väljalülitamist. Seega on täpne energiatarbimise prognoosimine oluline efektiivse võimsuse reguleerimise tagamiseks [17].

3. BILANSIENERGIATURUL OSALEMISE SIMULATSIOON

Antud peatükis käsitletakse bilansienergiaturul osalemise simulatsiooni, kasutades *MATLAB*'i keskkonda ja juhendaja poolt välja töötatud kolme mudelit: akusalvesti, veeboiler ja õhksoojuspump. Kuigi need mudelid ei ole algupäraselt seotud uurimistöö teemaga, on vajalik neid kohandada, lisades hinnastamismudeli ning samuti integreerida juurde bilansienergiaturg.

Peale nende muudatuste rakendamist on võimalik kasutada kohandatud mudeleid simulatsioonide läbiviimiseks. Simulatsioonide järel viiakse läbi tasuvusanalüüs, mille käsitlus leiab aset neljandas peatükis.

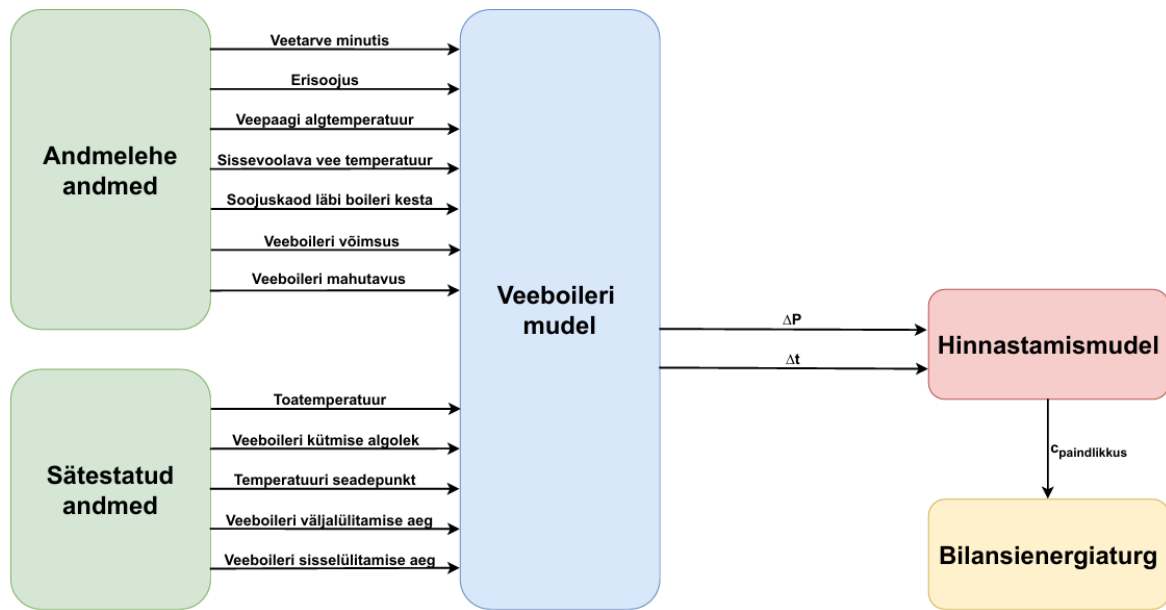
3.1 Veeboileri paindlikkuse hind

Antud peatükis kirjeldatakse ära koduse kuuma veeboileri süsteemi mudeli põhimõtet, mille abil on võimalik hiljem leida paindlikkuse hinda veeboileri jaoks. Mudeli peamine eesmärk on simuleerida kuuma vee tootmise ja tarbimise dünaamikat ühes majapidamises, võttes arvesse erinevaid parameetreid. Tegu on lihtsustatud mudeliga, mis on antud juhendaja poolt. Lõputöö raames autor täiendab mudelit, et hiljem teostada vajalikke simulatsioone töö probleemide lahendamiseks.

Autor pidi täiendama *MATLAB*'i programmi, kuna see ei väljastanud $\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ tulemusi, vaid ainult vajalikke $\Delta t_{\text{aktiivne}}$ tulemusi. Selleks oli vaja täiendada simulatsiooni koodi, mis võimaldaksid programmil väljastada $\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ tulemusi. Lisaks täiendati simulatsiooni koodi, et tsükli lõpus kõik andmed transformeeritaks *Excel*'i kujusse.

Parameeter Δt näitab, kui kaua on võimalik küttekatla sisse või välja lülitada, et vastata seatud temperatuurinõuetele ja paindlikkuse juhtimisvõimalustele. Lõpuks arvutab simulatsioon ΔP , mis näitab potentsiaalset muutust energiatarbimises ajas sõltuvalt süsteemi paindlikkusest. Kuumaveeboileri nimivõimsuseks oli lõputöö raames seatud 2 kW.

Lisaks täiendati simulatsiooni koodi, et tsükli lõpus kõik andmed transformeeritaks *Excel*'i kujusse. Joonis 3.1 kirjeldab simulatsiooni. Plokkskeem kirjeldab ära mis sisendeid *MATLAB* kasutab ja mis tulemusi väljastab ning kus neid väljundeid on edasi võimalik kasutada.



Joonis 3.1 Veeboileri mudeli plokk skeem

Kui kood töötas edukalt ja genereeris vajalikud parameetrid hinnastamismudeli jaoks, siis kõik tulemused konverteeriti *Excel*’i formaati. Ajasammuks oli valitud 1 minut terve aasta ulatuses, mis tähendab, et andmeid tuli kokku 525 600.

Excel’isse lisati täiendavalt bilansienergiaturu ajasammud koos pakutavate võimsuste ja hindadega. See on oluline, kuna see võimaldab järgnevalt hinnastamismudeli abil analüüsida, millal oleks optimaalne veeboilerit sisse või välja lülitada, et saavutada paindlikkuse pakkumisest tulenevat kasumit.

Alljärgnevalt autor kirjeldab samm-sammult töökäiku, mis oli vajalik oluliste tulemuste saavutamiseks *Excel*’is.

1. Teisendatakse ΔP (MWh) megavattideks (MWh),
2. Leitakse iga tunni (60 min) kohta suurim võimsus,
3. Arvutatakse tabeli (Tabel 2.3) andmete kohaselt hind iga tunni kohta,
4. Bilansienergiaturu mudeli kohaselt leitakse hetked millal on vaja ja saab pakkuda võimsust,
5. Võrreldakse kas bilansienergiaturu pakutud hind on suurem, kui hinnastamismudelis arvutatud hind,
6. Kirjutatakse kõik sobilikud, hetked millal ollakse nõus paindlikkust pakkuma,
7. Filtreeritakse iga 24 h tagant parim ja kasumlikum hetk, millal paindlikkust pakkuda,

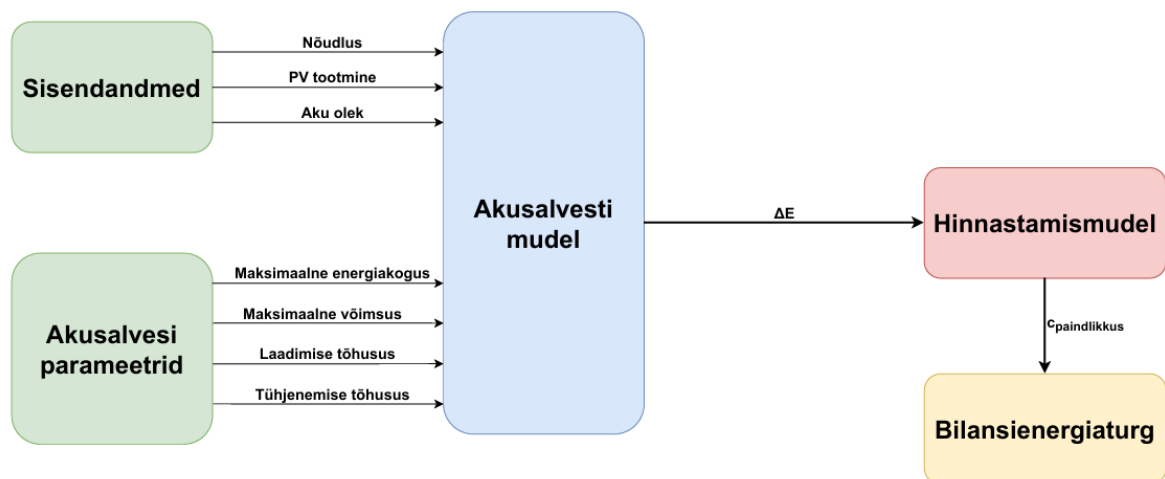
8. Leitakse võimsus, iga kord kui pakuti paindlikkust,
9. Võetakse kokku kõik tulemused, et analüüsida tasuvust.

Kui oli välja filtreeritud suurimad ΔP võimsuse väärtused iga tunni kohta, sai väga lihtsasti arvutada ΔE väärtus, mis on toodud välja valemi (2.2) kujul. Teades ΔE väärtusi iga tunni kohta oli võimalik leida hinnastamismudeli valemi (2.1) kohaselt hind iga tunni kohta, mida läks hiljem vaja, et võrrelda bilansienergiaturu hindadega.

3.2 Akusalvesti paindlikkuse hind

Selles peatükis kirjeldatakse ära koduse akusalvesti süsteemi mudeli põhimõtet, mille abil on võimalik hiljem leida paindlikkuse hinda akusalvesti jaoks. Autor toob välja kõik tegevused, mida saavutatud tulemuse jaoks tuli teostada ja kirjeldab kõik üksikasjaliselt lahti.

Akusalvesti parameetriteks oli seatud tipuvõimsuseks 5 kW ning mahtuvusaeg 13.5 kWh. Lisaks oli mudelisse seadistatud terve aasta minutite kaupa nõudlus, PV tootmine ja aku olek. Kui veeboileri mudeli kaudu sai väljastatud parameetrid ΔP ja Δt , siis akusalvesti mudeli väljastas koheselt ΔE valemi (2.2) kohaselt. Joonis 3.2 kirjeldab akusalvesti mudeli plokk skeemi, kus on välja toodud akusalvesti kõik sisendid ja väljundid.



Joonis 3.2 Akusalvesti mudeli plokk skeem

Nagu eelmises alapeatükis 3.1 kirjeldatud, siis autor pidi konverteerima kõik *MATLAB*'i tulemused *Excel*'i formaati, mille kaudu on pärast võimalik välja töötada hinnastamismudel. Ajasammuks oli valitud 1 minut terve aasta ulatuses, mis tähendab, et andmeid tuli kokku 525 600.

Alljärgnevalt autor kirjeldab samm-sammult töökäiku, mis oli vajalik oluliste tulemuste saavutamiseks *Excel*'is.

1. Teisendatakse ΔE (Wmin) megavattideks (MWh),
2. Leitakse iga tunni (60 min) kohta suurim võimsus,
3. Arvutatakse tabeli (Tabel 2.3) andmete kohaselt hind iga tunni kohta,
4. Bilansienergiaturu mudeli kohaselt leitakse hetked millal on vaja ja saab pakkuda võimsust,
5. Võrreldakse kas bilansienergiaturu pakutud hind on suurem, kui hinnastamismudelis arvatud hind,
6. Kirjutatakse kõik sobilikud, hetked millal ollakse nõus paindlikkust pakkuma,
7. Filtreeritakse iga 24 h tagant parim ja kasumlikum hetk, millal paindlikkust pakkuda,
8. Leitakse võimsus, iga kord kui pakuti paindlikkust,
9. Võetakse kokku kõik tulemused, et analüüsida tasuvust.

Peatükis 4 esitatakse kõik *Excel*'i analüüsi käigus saadud tulemused, illustreeritud selgete graafikutega.

3.3 Õhksoojuspumba paindlikkuse hind

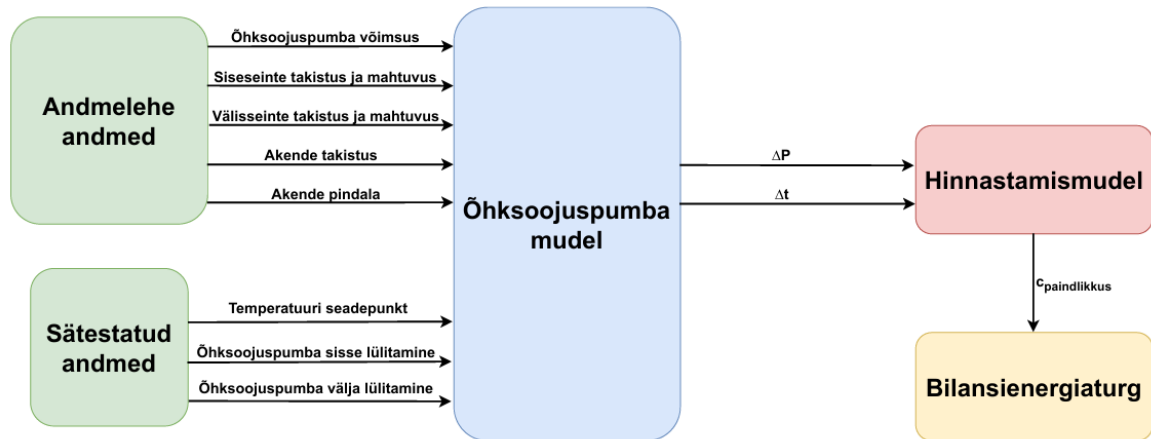
Antud peatükis kirjeldatakse ära koduse õhksoojuspumba süsteemi mudeli põhimõtet, mille abil on võimalik hiljem leida paindlikkuse hinda õhksoojuspumba jaoks. Nagu veeboileri ja akusüsteemi mudelid, on ka õhksoojuspumba mudel välja töötatud juhendaja poolt. Lõputöö raames autor täiendab mudelit, et hiljem teostada vajalikke simulatsioone töö probleemide lahendamiseks.

Autor pidi täiendama *MATLAB*'i programmi, kuna see ei väljastanud $\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ tulemusi, vaid ainult vajalikke $\Delta t_{\text{aktiivne}}$ tulemusi. Selleks oli vaja täiendada simulatsiooni koodi, mis võimaldaksid programmil väljastada $\Delta P_{\text{paindlikkus},T}$ tulemusi.

Õhksoojuspumba tipuvõimsuseks oli seatud 2,6 kW.

Lisaks täiendati simulatsiooni koodi, et tsükli lõpus kõik andmed transformeeritaks *Excel*'i kujusse. Joonis 3.3 kirjeldab simulatsiooni plokk skeemi. Plokk skeem kirjeldab

ära mis sisendeid *MATLAB* kasutab ja mis tulemusi väljastab ning kus neid väljundeid on edasi võimalik kasutada.



Joonis 3.3 Õhksoojuspumba mudeli plokk skeem

Alljärgnevalt autor kirjeldab samm-sammult töökäiku, mis oli vajalik oluliste tulemuste saavutamiseks *Excel*'is.

1. Teisendatakse ΔP (MWh) megavattideks (MWh),
2. Leitakse iga tunni (60 min) kohta suurim võimsus,
3. Arvutatakse tabeli (Tabel 2.3) andmete kohaselt hind iga tunni kohta,
4. Bilansienergiaturu mudeli kohaselt leitakse hetked millal on vaja ja saab pakkuda võimsust,
5. Võrreldakse kas bilansienergiaturu pakutud hind on suurem, kui hinnastamismudelis arvutatud hind,
6. Kirjutatakse kõik sobilikud, hetked millal ollakse nõus paindlikkust pakkuma,
7. Filtreeritakse iga 24 h tagant parim ja kasumlikum hetk, millal paindlikkust pakkuda,
8. Leitakse võimsus, iga kord kui pakuti paindlikkust,
9. Võetakse kokku kõik tulemused, et analüüsida tasuvust.

Kõigi kolme mudeli korral oli lahenduskäik väga sarnane, seega oli oluline luua üks korrektne *Excel*'i mudel, mida sai seejärel integreerida kõigi teiste seadmetega. Kui vajalikud tulemused olid saavutatud, oli vaja integreerida bilansienergiaturu mudel, millest räägitakse lähemalt järgmises peatükis 3.4.

3.4 Bilansienergiaturu mudel

Eelnevates peatükkides on mainitud, et tuli välja filtreerida suurimad ja väiksemad võimsused iga 24h jaoks. See oli vajalik, kuna bilansienergiaturg on iga tunni kaupa. Aga kuna andmeid oli iga minuti kaupa, ei olnud võimalik koheselt analüüsi teostada. Selleks tuli koostada funktsioon, mis järgiks loogikat, et valitakse iga 60 min jooksul suurim väärtus ja salvestatakse see uuele reale. 525 600 reast sai kokku pärast 8 760 rida, mida pärast sai teha kokku 365 reaks, kuna valiti päeva parim tulemus.

Bilansienergiaturu hinnad ja võimsused on võetud *Baltic Transparency Dashboard* kodulehelt [26]. Tabelis on lisaks Eestile ka Läti, Leedu, Soome ja Rootsi üles- ja allareguleerimise hinnad. Selleks tuli kõik teised riigid eemaldada peale Eesti. Kõiki andmeid oli võimalik lihtsasti üle viia *Excel'i* kujusse, et hiljem analüüsida.

Ülesreguleerimise ja allareguleerimise juures lähtus autor järgnevast loogikast, mida kasutati kõigi seadmete paindlikkuse hinna juures:

- Ülesreguleerimise puhul ei tarbita, lülitatakse seade välja
- Allareguleerimise puhul tarbitakse, lülitatakse seade sisse.

Vastavalt sellele loogikale tuli analüüsida bilansienergiaturu mudelis pakutavaid võimsusi. Autor seadis tingimuseks, et aktiveerimised viiakse läbi üks kord päevas. Selline tingimus tagab kasutajamugavuse ja seadme õige toimimise. Kui olid saadud parimad päevased tulemused nii allareguleerimise kui ka ülesreguleerimise jaoks *Excel'i* tabelisse, järgiti funktsiooni, mis valib aktiveerimise suuna, kus tasuvus on suurem.

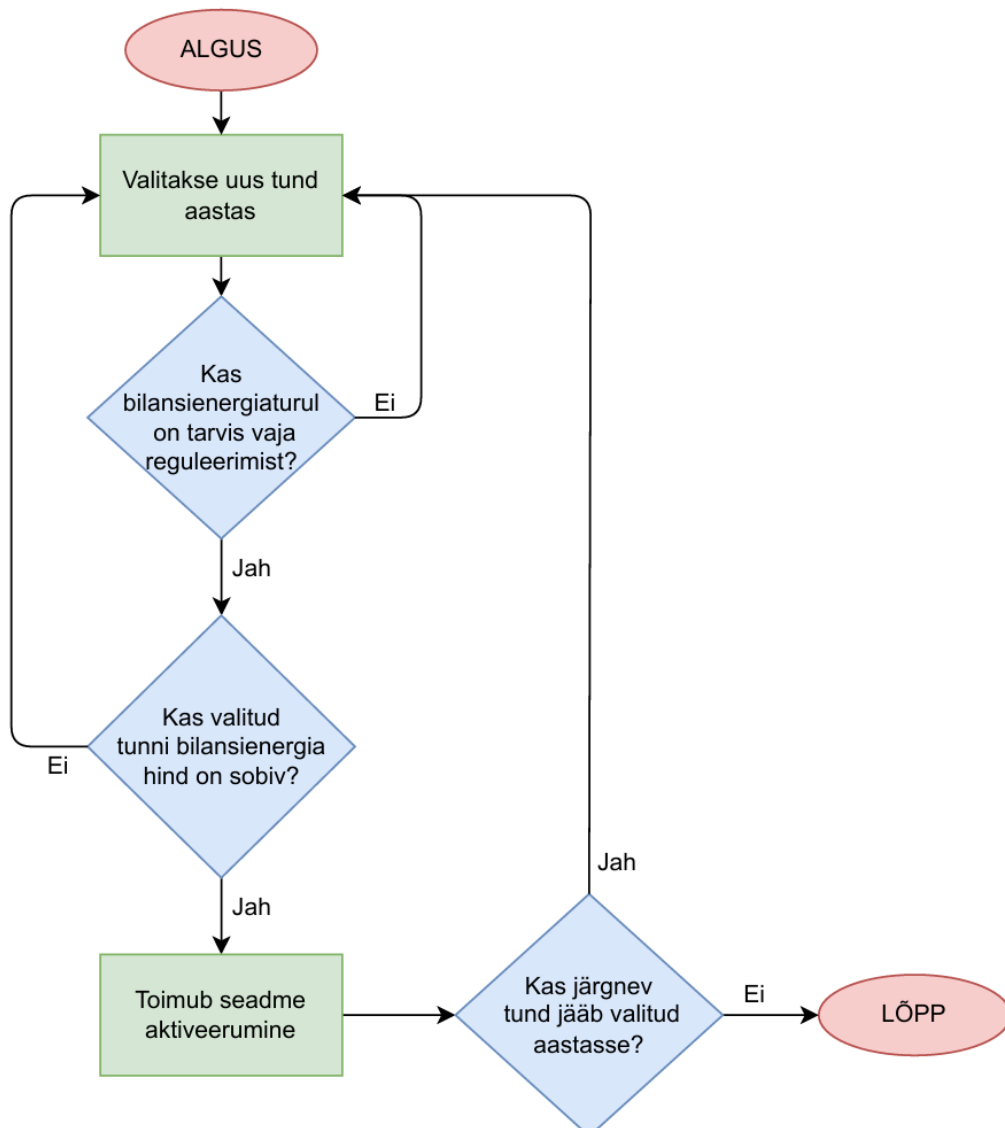
Bilansienergiaturu mudelis olid nii võimsustel kui ka hindadel positiivsed ja negatiivsed märgid numbrite ees. Need detailid on olulised, kuna need määravad, millal on vaja võimsust ning kui palju selle eest makstakse. Kui võimsust ei vajata, siis peab paindlikkust pakkuv osapool ise kandma kulusid, mis tähendab kahjumit. Autor pidi lähtuma antud loogikast, kuna see mõjutab suuresti tasuvus analüüsi.

Tabel 3.1 käsitleb bilansienergiaturu mudelit ning selle komponente, millele autor pidi suurt tähelepanu pöörama bilansienergiaturu simulatsiooni teostamisel. Esimene kategooria grupp on „mFRR aktiveerimine“ ja teine kategooria on „Tasakaalustamise energia hind“.

Tabel 3.1 Kategoriseeritud bilansienergiaturu mudel

Bilansienergiaturu mudel			
mFRR aktiveerimine		Tasakaalustamise energia hind	
Ülesreguleerimine (MWh)	Allareguleerimine (MWh)	Ülesreguleerimine (EUR/MWh)	Allareguleerimine (EUR/MWh)

Lisaks toob autor esile bilansienergiaturu mudeli abil koostatud agregeeritud juhtimise simulatsiooni plokkskeemi, et mis loogikast lähtuti, kui teostati analüüse. Antud plokkskeem oli alus sellele, et kuidas autor lähtus loogikast tegemaks tasuvusanalüüse ja muid vajalikke analüüse. Joonis 3.4 annab selge ülevaate agregeeritud juhtimisest.



Joonis 3.4 Agregeeritud juhtimise plokkskeem

Joonis 3.4 põhjal on näha, et autor käsitles alla- ja ülesreguleerimist võrdselt, kuna antud loogika kehtib mõlema reguleerimisviisi korral ühtemoodi.

Järgnevalt toob autor esile, et üles- ja allareguleerimine on võimalik ainult juhul, kui bilansienergia on suurem kui null. See tähendab, et kui mingil aastatunnil on bilansienergia väärtus positiivne, siis oli võimalik läbi viia reguleerimisi. Kui aga energia tase on null, siis reguleerimine ei ole vajalik.

Kui eelnev tingimus oli täidetud, tuli lisaks sellele täita veel üks tingimus. Juhul kui vajati bilansienergiaturul energiat ehk siis reguleerimist, tuli vaadelda lisaks sellele ka bilansienergiaturu poolt pakutavaid hindu. Ehk siis valitud tunnil peab olema bilansienergia hind suurem kui autori poolt välja arvatud hinnastamismudeli kohaselt hind. Kui need tingimused olid täidetud, oli võimalik teostada aktiveerimist, nii et paindlikkust pakkudes ei jäädaks kahjumisse ja saavutatakse tasuvus õige aegselt.

Järgnevalt pidi autor teostama ka lisa kriteeriumi, kus *Excel* valis üles- ja allareguleerimise jooksul iga 24 tunni tagant parima hinna. Ehk siis eesmärk oli saada kätte iga päeva parim hind, kuna autor seadis kriteeriumiks, et teostatakse reguleerimist üks kord päevas.

Kui teati iga päeva jaoks üles- ja allareguleerimise parimaid hindu, tuli *Excel*'i lisada täiendav tingimus, et tagada juhul, kui üles- ja allareguleerimise hinnad olid samal tunnil, valitakse alati kõrgema hinna reguleerimine. Selle põhjuseks oli asjaolu, et seadet ei saa samal ajal sisse ja välja lülitada. See lisatingimus väldib sellist olukorda ja tagab, et seadet saab sisse ja välja lülitada vastavalt parimale hinnale, kuna autor soovib maksimeerida kasumit reguleerimiste käigus.

Autor on läbi viinud analüüsi kõigi kolme seadme kohta, kasutades kolmeaastaseid bilansienergiaturu andmeid. Kuigi autor soovis ulatuda veelgi kaugemale minevikku, ei olnud kahjuks andmeid saadaval enne aastat 2021. Viimased kättesaadavad andmed hõlmavad perioodi 2021–2023.

Kõik vajalikud tulemused, mis on saadud edukalt *Excel*'i töötlemise käigus, koos põhjalike kirjeldustega, kajastatakse peatükis 4. Selles osas toob autor esile tasuvusanalüüsi koos tulemuste ja järeldustega, pakkudes sügavamat arusaamist uuritava teema kohta.

4. PAINDLIKE SEADEMETE AGREGEERITUD JUHTIMISE TASUVUSE ANALÜÜS

Paindlike seadmete agregeeritud juhtimise tasuvusanalüüsi jaoks kasutati *Excel*'it, kuhu olid konverteeritud *MATLAB*'i tulemused. Autor pidi läbi viima põhjaliku andmete analüüsi kõigi kolme seadme puhul, kirjutades erinevaid funktsioone ja makrosid, et saavutada soovitud tulemusi. Autor viis läbi analüüsid järgmiste seadmete kohta: veeboiler, õhksoojuspump ja akusalvesti. Oluline on mainida, et autor kasutas bilansienergiaturu viimase kolme aasta andmeid, mille abil oli võimalik teha vajalikke analüüse.

Autor teostas analüüsiks mitmeid erinevaid analüüse:

- reguleerimist vajav aktiveerimiste arv aastas,
- ülesreguleerimise tulu,
- allareguleerimise tulu,
- ülesreguleerimise pakutavad võimsused,
- allareguleerimise pakutavad võimsused,
- paindliku seadme tasuvus,
- bilansienergiaturul reguleerimist vajavad hetked.

Kõikide analüüsi graafikute teostamiseks on kasutatud *Excel Charts*'i funktsioone. Lisaks graafikutele on autor juurde toonud lisa tabelid, et anda parem ja detailsem ülevaade teostatud katsetulemustest.

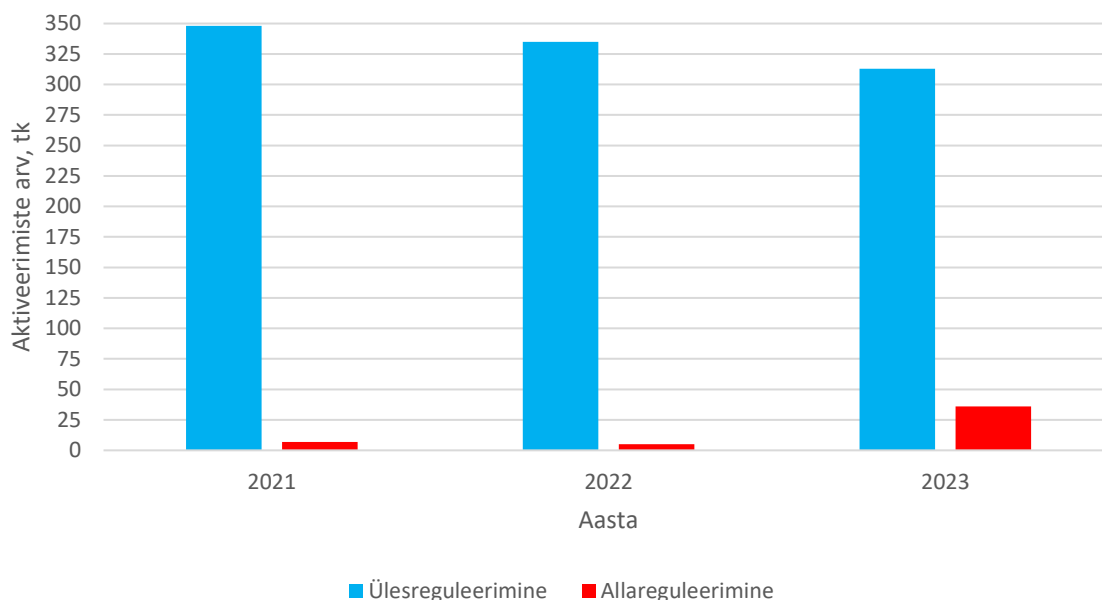
Tasuvusanalüüsi koostamisel on oluline arvesse võtta agregaatore vahendustasu. Seetõttu võttis autor ühendust kohaliku agregaatoriga, et saada teavet nende teenustasude kohta. Kohalike agregaatore teenustasud ulatuvad tavaliselt 30-50% tulust, mistõttu autor eelistab lihtsamat lähenemist, võttes arvesse keskmise vahendustasu, st 40% tulust läheb agregaatorele. See valik põhineb eeldusel, et agregaatore oleks valmis reguleeritavaid võimsusi väiksemate majapidamiste jaoks üldse agregeerima. Lisaks tasub meeles pidada, et agregaatore teenustasu võib erineda sõltuvalt konkreetsetest tingimustest ja kokkulepetest ning lõplik protsent selgub alles lepingu jõustumisel.

4.1 Veeboileri analüüs

Järgmises peatükis esitletakse veeboileri üles- ja allareguleerimise tulemusi. Analüüsis kasutati viimase kolme aasta (2021–2023) bilansienergiaturu mudeli andmeid ning koos hinnastamismudeli rakendamisega saadi vajalikud tulemused, et läbi viia veeboileri analüüse.

4.1.1 Üles- ja allareguleerimise aktiveerimised

Autor seadis reegli, et tavaliselt toimub päeva jooksul ainult üks kord aktiveerimine. Kui oli vajadus nii ülesreguleerida kui ka allareguleerida samal tunnil, eelistati alati aega, mis teenusepakkujale rohkem kasumit tõi. Joonis 4.1. on esitatud tulemused, et anda selgem ülevaade sellest, kui palju oli võimalik veeboilerit aktiveerida nii, et teenusepakkuja jääks kasumisse vastavalt hinnastamismudeli arvutustele.



Joonis 4.1 Veeboileri aktiveerimised aastate lõikes

Joonis 4.1 põhjal selgub, et aastal 2021 toimus kõige rohkem aktiveerimisi ja kõige vähem aktiveerimisi aastal 2023 kui teostati ülesreguleerimist. Ehkki ülesreguleerimist vajati kolme aasta jooksul kõige rohkem, oli aastal 2023 märgatavalt suurem nõudlus allareguleerimise järele. Aastatel 2021 ja 2022 oli allareguleerimise vajadus palju väiksem. Tabel 4.1 kirjeldab täpset arvu reguleerimisi iga aasta kohta.

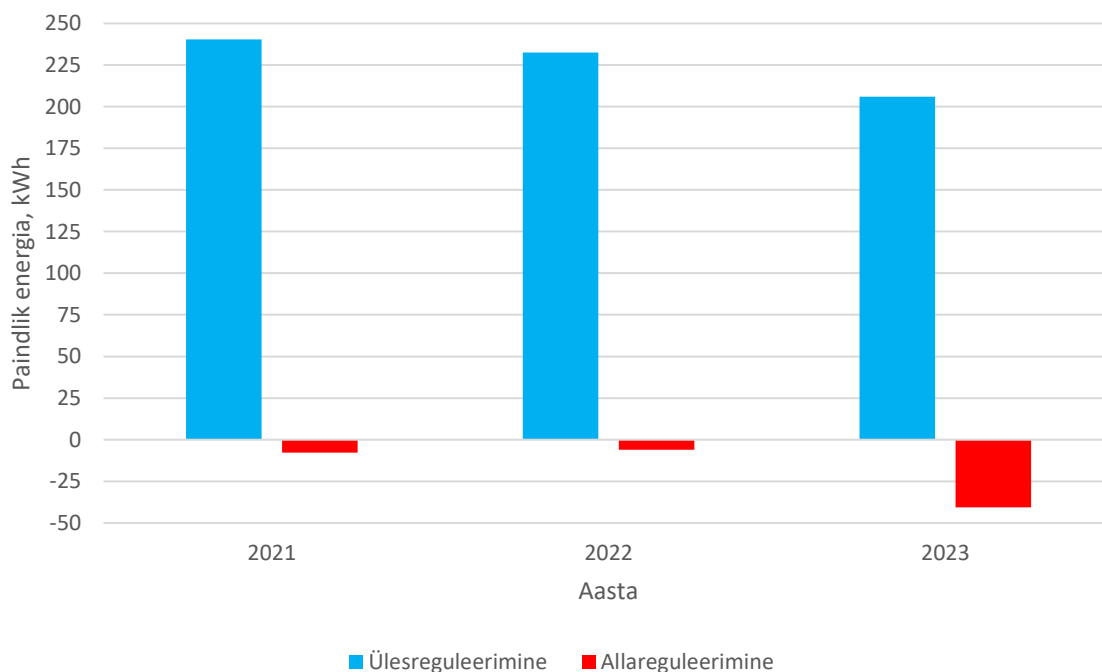
Tabel 4.1 Veeboileri aktiveerimiste arv aastate lõikes

Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimiste arv, tk	348	335	313
Allareguleerimiste arv, tk	7	5	36
Kokku, tk	355	340	349
Mitu % võimalikest aktiveerimistest	97,3%	93,2%	95,6%

Tabel 4.1 põhjal selgub, et veeboilerit oli võimalik aasta jooksul reguleerida bilansienergiaturul üle 90% juhtudest, mis muudab selle seadme ülimalt paindlikuks, kuna reguleerimine on praktiliselt võimalik igapäevaselt.

4.1.2 Veeboileri üles- ja allareguleeritud energia

Teades eelneva alapeatükki kohaselt, mitu korda oli võimalik aktiveerimisi teostada igal aastal, on võimalik välja tuua reguleerimist pakutud energia, mida aktiveerimiste käigus reguleeriti. Joonis 4.2 kirjeldab seda.



Joonis 4.2 Veeboileri reguleeritud energia aastate lõikes

Joonis 4.2 kaudu saab kinnitada, et vastavalt aktiveerimiste arvule on võimsus aastate lõikes muutlik. Mida rohkem oli aktiveerimisi üles- ja allareguleerimisel, seda suuremas ulatuses oli võimalik energiat reguleerida. Näiteks aastal 2023 oli kõige rohkem aktiveerimisi allareguleerimisel, mis tõi kaasa suurima energiakoguse reguleerimise sel aastal. Sama kehtib ka ülesreguleerimise kohta: aastal 2021 tagati kõige suurem

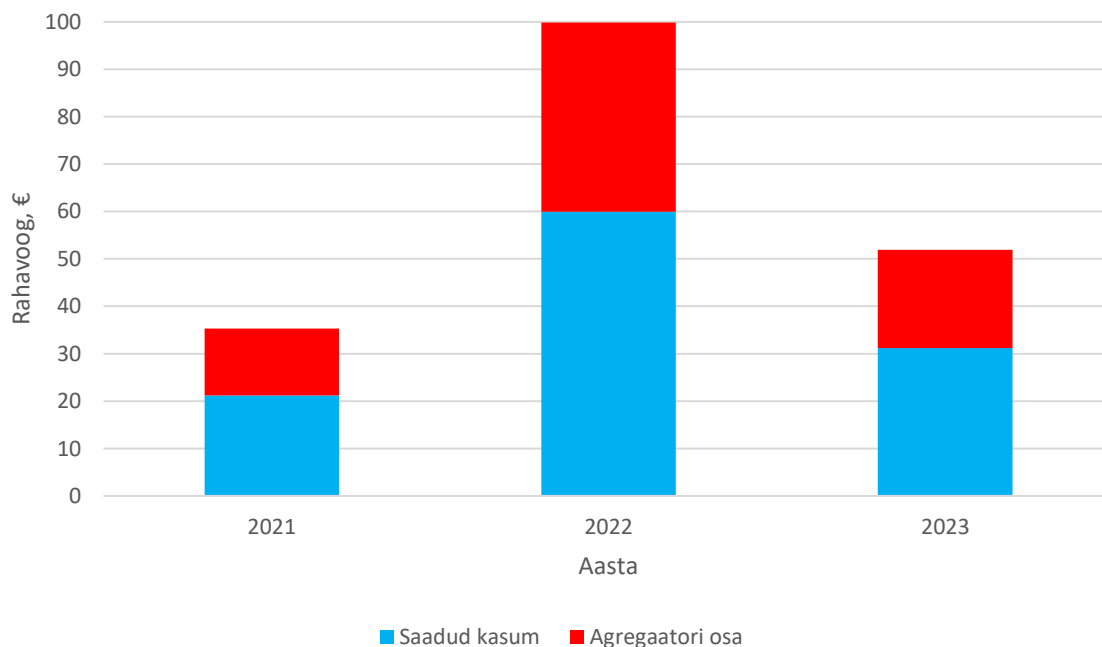
ülesreguleerimise energia. Tabel 4.2. tuuakse välja täpne energiakogus, mida konkreetsel aastal üles- ja allareguleeriti.

Tabel 4.2 Veeboileri reguleeritud energia aastate lõikes

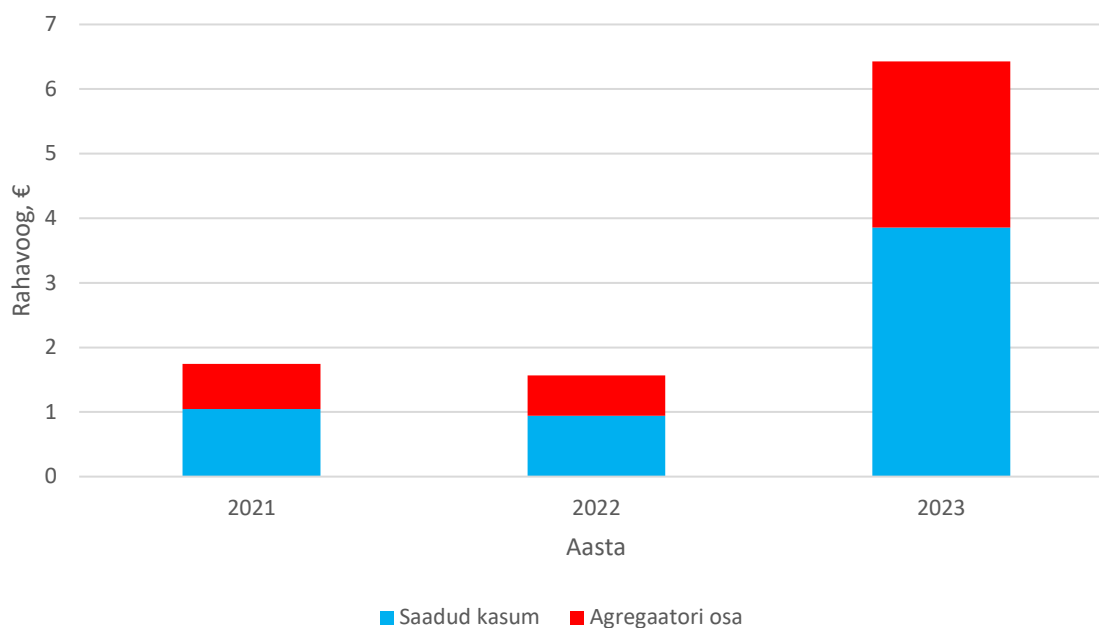
Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimine, (kWh)	240,40	232,60	206,07
Allareguleerimine, (kWh)	-7,70	-5,97	-40,60

4.1.3 Veeboileri üles- ja allareguleerimise tulu

Kasutades eelnevate alapeatükkide poolt esitatud teavet aktiveerimiste arvu ja reguleeritud energia kohta, on võimalik välja tuua veeboileri üles- ja allareguleerimisest saadav tulu. Tulu näitab rahavoogu, mida reguleerimistest saadi, kuid see ei ole veel paindlikkust pakkuvale osapoolle jõudnud puhas kasum. Selleks tuleb tulust maha arvestada ka agregaatori osa, alles seejärel saab rääkida tegelikust kasumist. Autor esitab kahe erineva joonise kaudu ülesreguleerimise ja allareguleerimise rahavoogude jaotust. Joonistel on võimalik välja lugeda, palju kasumit teeniti ning kui suur on agregaatori osa. Joonis 4.3 kirjeldab ülesreguleerimise rahavoogu. Joonis 4.4 kirjeldab allareguleerimise rahavoogu.



Joonis 4.3 Veeboileri ülesreguleerimise rahavoogude jaotus



Joonis 4.4 Veeboileri allareguleerimise rahavoogude jaotus

Agregaator saab endale 40% teenitud tulust, seega reguleerimist pakkuv osapool saab lõpuks 60% kasumit kogu teenitud tulust. Tabel 4.3 kirjeldab ülesreguleerimise täpset rahavoogude summasid. Tabel 4.4 kirjeldab allareguleerimise täpset rahavoogude summasid.

Tabel 4.3 Veeboileri ülesreguleerimise rahavoogude jaotus

Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	35,31	99,87	51,93
Agregaatori osa, €	14,12	39,95	20,77
Saadud kasum, €	21,18	59,92	31,16

Tabel 4.4 Veeboileri allareguleerimise rahavoogude jaotus

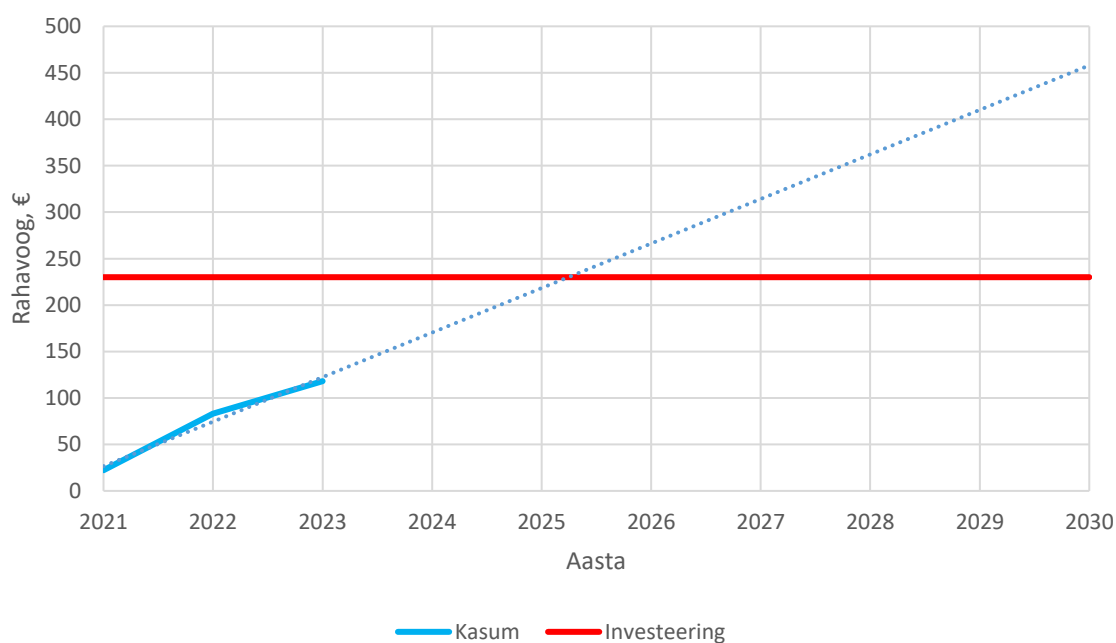
Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	1,75	1,57	6,43
Agregaatori osa, €	0,70	0,63	2,57
Saadud kasum, €	1,05	0,94	3,86

Antud tulemuste põhjal võib järeldada, et bilansienergia hinnad olid aastal 2022 kõige kõrgemad, samas kui madalaimad hinnad olid aastal 2021 ülesreguleerimisel. Seetõttu oli kõige kasumlikum teostada ülesreguleerimist aastal 2022, kui aktiveerimistest saadud tulu oli võrreldes 2021. aastaga 184% kõrgem. Aasta 2023 osutus ülesreguleerimise seisukohast kõige optimaalsemaks, kuna bilansienergia turuhinnad olid sel aastal keskmised võrreldes 2021. ja 2022. aastaga.

Lisaks tulemuste põhjal on märgata märkimisväärset kasvu allareguleerimises aastal 2023 võrreldes eelnenud kahe aastaga. 2022. aastal teeniti allareguleerimisest kõige vähem. 2023. aastal oli võimalik allareguleerimisega teenida isegi 310% rohkem kasumit võrreldes 2022. aastaga. Kuigi summad võivad olla väikesed, annab see siiski selge ülevaate, et 2023. aastal oli allareguleerimist vajavate momentide arv suurem kui varasematel aastatel ning vastavalt sellele maksti rohkem.

4.1.4 Veeboileri tasuvusaeg

Kasutades igal aastal saavutatud kasumiandmeid, on võimalik teostada veeboileri tasuvusanalüüs, kus esitatakse tasuvusaja graafik. Kuna autoril olid kättesaadavad ainult kolme aasta andmed ja tuleviku bilansienergiaturgu ei ole võimalik täpselt ette ennustada, kasutatakse selleks *Excel*'i funktsiooni nimega *trendline*. Graafikul on näidatud aastad 2021-2030, arvestades, et tasuvusaja hinnanguline kestvus on 10 aastat. Joonis 4.5 kirjeldab tasuvusaja graafikut.



Joonis 4.5 Veeboileri tasuvusaeg

Joonis 4.5 pealt saab välja lugeda, et veeboileri tasuvusaeg saabub 2026. aasta esimeses pooles. Selleks ajaks on kogu alginvesteering tagasi teenitud, võimaldades paindlikkust pakkujal edaspidi puhaskasumit saada. Kuna analüüs hõlmab kümneaastast perioodi, siis on prognoositud, et aastaks 2030 on kogutud rahavoog ligikaudu 450 eurot. Pärast alginvesteeringu mahaarvamist jääb paindlikkust pakkujale puhtalt kasumiks 220 eurot.

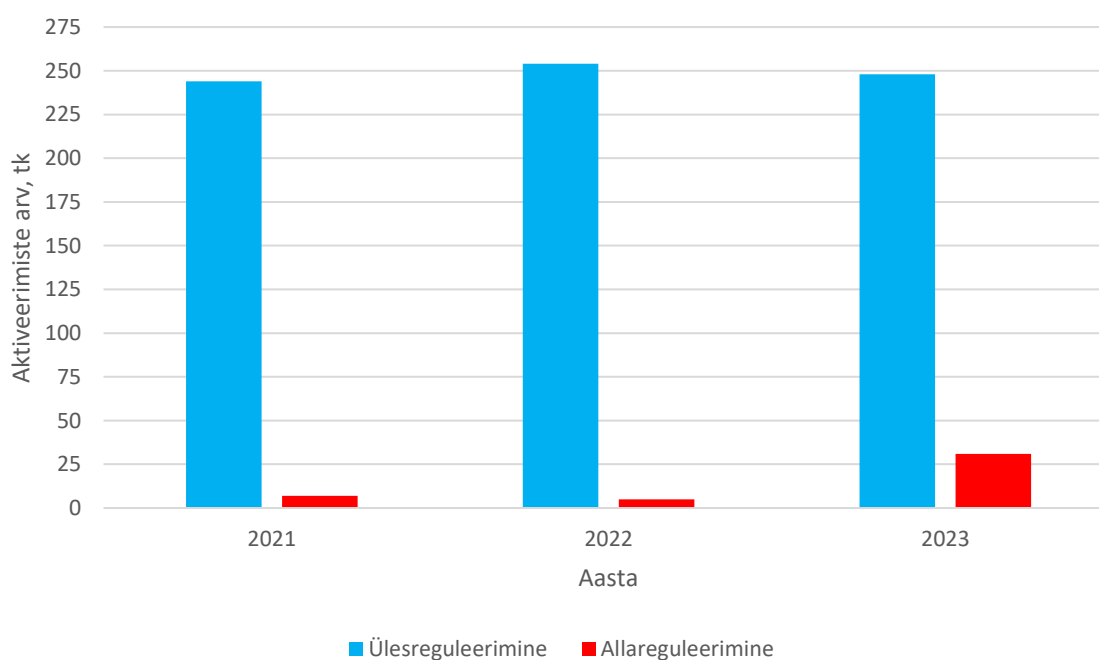
Siinkohal tuleb kindlasti märkida, et selles töös ei lisatud veeboileri enda seadme hinnangulist maksumust juurde. Autor eeldab, et see on juba tasutud paindlikkust pakkujal, kuna sellised seadmed on tänapäeval väga populaarsed.

4.2 Akusalvesti analüüs

Järgmises peatükis esitletakse akusalvesti üles- ja allareguleerimise tulemusi. Analüüsis kasutati viimase kolme aasta (2021–2023) bilansienergiaturu mudeli andmeid ning koos hinnastamismudeli rakendamisega saadi vajalikud tulemused, et läbi viia akusalvesti analüüse.

4.2.1 Üles- ja allareguleerimise aktiveerimised

Nagu veeboileri puhul, siis samuti autor seadis reegli akusalvestite puhul, et toimub aktiveerimine üks kord päevas. Kui oli vajadus nii üles kui ka all reguleerida samal tunnil, eelistati alati aega, mis teenusepakkujale rohkem tulu tõi. Allpool esitatud joonisel on toodud tulemused, et anda selgem ülevaade sellest, kui sageli oli võimalik akusalvestit aktiveerida nii, et teenusepakkuja jääks kasumisse vastavalt hinnastamismudeli arvutustele. Joonis 4.6 kirjeldab seda.



Joonis 4.6 Akusalvesti aktiveerimised aastate lõikes

Joonis 4.6 põhjal selgub, et aastal 2021 toimus kõige vähem aktiveerimisi ja kõige rohkem aktiveerimisi aastal 2023 ülesreguleerimise korral. Kuigi ülesreguleerimist vajati kolme aasta jooksul kõige rohkem, märgati aastal 2023 märgatavalt suuremat nõudlust

allareguleerimise järele. Aastatel 2021 ja 2022 oli allareguleerimise vajadus oluliselt väiksem. Reguleerimiste arv on oluliselt vähenenud võrreldes veeboileriga, peamiselt tingituna akusalvesti algsest investeerimiskulust. Tabel 4.5 kaudu on näidatud täpne reguleerimiste arv igal aastal.

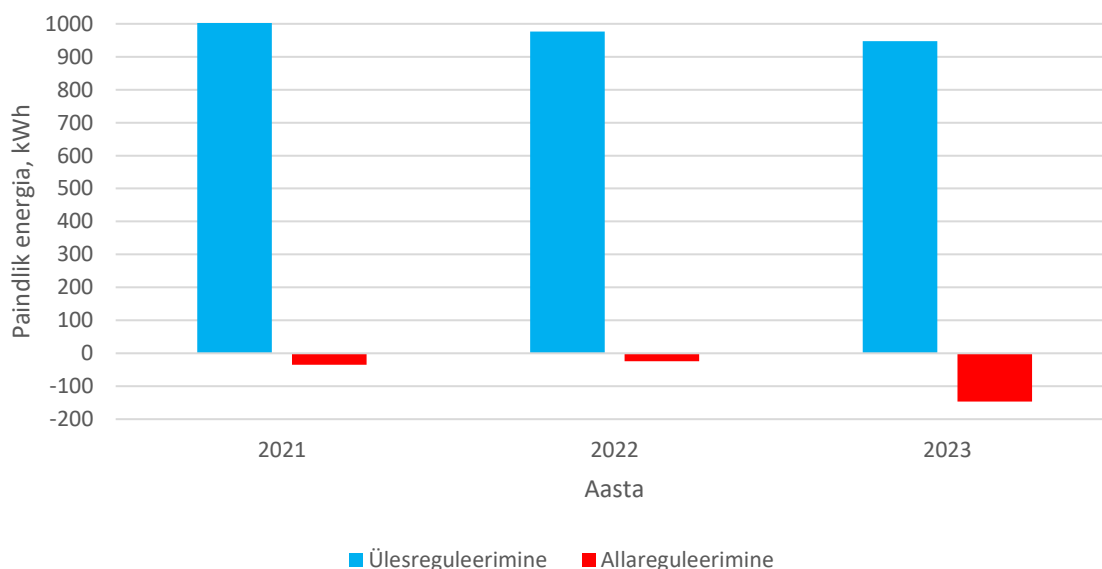
Tabel 4.5 Akusalvesti aktiveerimiste arv aastate lõikes

Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimiste arv, tk	244	254	248
Allareguleerimiste arv, tk	7	5	31
Kokku, tk	251	259	279
Mitu % võimalikest aktiveerimistest	68,8%	71,0%	76,4%

Tabel 4.5 põhjal selgub, et akusalvestit oli võimalik aasta jooksul reguleerida bilansienergiaturul ligikaudu 72% juhtudest, mis muudab selle seadme vähem paindlikumaks kui veeboiler, kuna reguleerimine ei ole garanteeritud igapäevaselt. Nagu juba mainitud, on akusalvesti esialgne investering niivõrd märkimisväärne, et see võib oluliselt mõjutada aktiveerimiste arvu.

4.2.2 Akusalvesti üles- ja allareguleeritud energia

Teades eelneva alapeatükki kohaselt, mitu korda oli võimalik aktiveerimisi teostada igal aastal, on võimalik välja tuua reguleerimist pakutud energia, mida aktiveerimiste käigus reguleeriti. Joonis 4.7 kirjeldab seda.



Joonis 4.7 Akusalvesti reguleeritud energia aastate lõikes

Joonis 4.7 analüüs näitab, et vastavalt aktiveerimiste arvule on võimsus aastate lõikes muutuv. Mida rohkem oli aktiveerimisi nii üles- kui ka allareguleerimisel, seda suurem

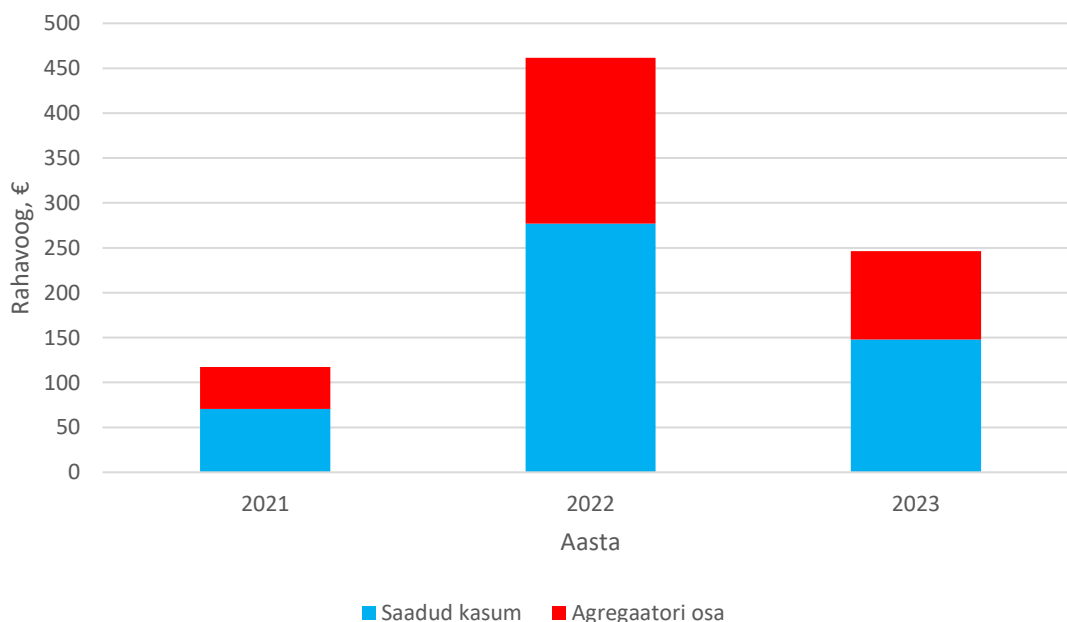
oli energiakoguse reguleerimine. Näiteks aastal 2023 toimus kõige rohkem aktiveerimisi allareguleerimisel, mis tingis suurima energiakoguse reguleerimise sel aastal. Sama kehtib ka ülesreguleerimise osas: aastal 2021 saavutati kõrgeim ülesreguleerimise energia tase. Tabel 4.6 kujul esitatakse täpsed energiakogused, mis reguleeriti nii üles- kui ka allareguleerimisel igal aastal.

Tabel 4.6 Akusalvesti reguleeritud energia aastate lõikes

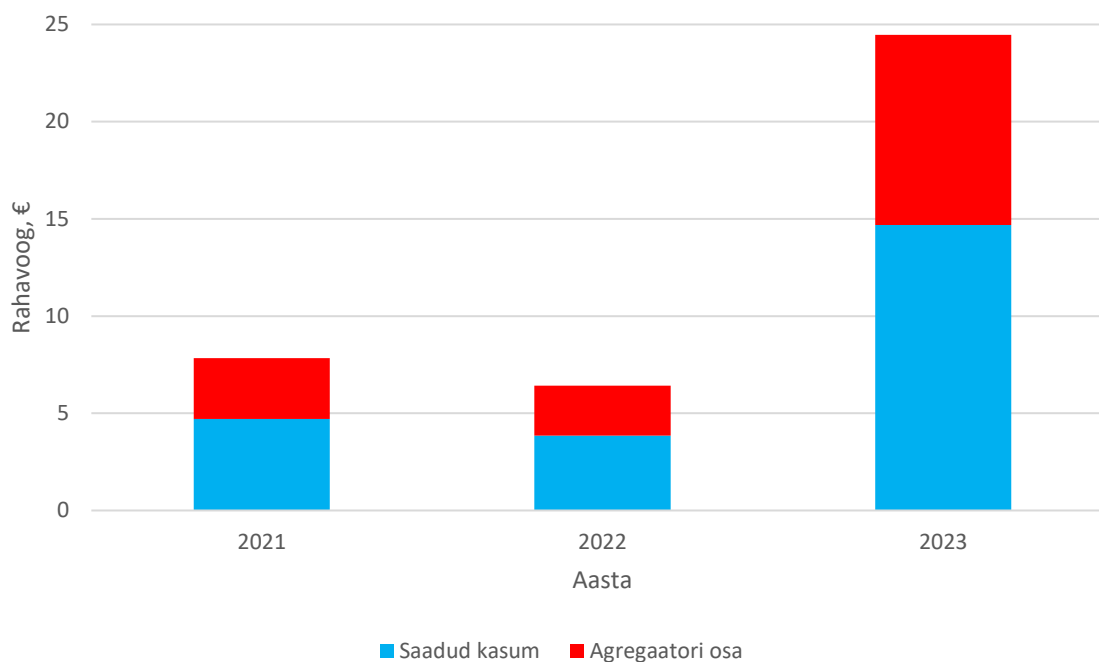
Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimine, (kWh)	1004,33	976,66	947,84
Allareguleerimine, (kWh)	-35,13	-24,60	-146,24

4.2.3 Akusalvesti üles- ja allareguleerimisest tulenev tulu

Kasutades eelnevates alapeatükkides esitatud teavet aktiveerimiste arvu ja reguleeritud energia kohta, on võimalik välja tuua akusalvesti üles- ja allareguleerimisest saadav tulu. Tulu kajastab rahavoogu, mida reguleerimistest saadi, kuid see ei ole veel paindlikkust pakkuvale osapoolle jõudnud puhas kasum. Selleks tuleb tulust maha arvestada ka agregaatori osa, alles seejärel saab rääkida tegelikust kasumist. Autor esitab kahe erineva joonise kaudu ülesreguleerimise ja allareguleerimise rahavoogude jaotust. Joonistel on võimalik välja lugeda, palju kasumit teeniti ning kui suur on agregaatori osa. Joonis 4.8 kirjeldab ülesreguleerimise rahavoogu. Joonis 4.9 kirjeldab allareguleerimise rahavoogu.



Joonis 4.8 Akusalvesti ülesreguleerimise rahavoogude jaotus



Joonis 4.9 Akusalvesti allareguleerimise rahavoogude jaotus

Sarnaselt veeboileri reguleerimisega saab akusalvesti reguleerimise eest agregator endale 40% teenitud tulust, jättes reguleerimisteenust pakkuvale osapoolele lõpuks 60% kogu teenitud kasumist. Tabel 4.7 kirjeldab ülesreguleerimise täpset rahavoogude summasid. Tabel 4.8 kirjeldab allareguleerimise täpset rahavoogude summasid.

Tabel 4.7 Akusalvesti ülesreguleerimise rahavoogude jaotus

Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	117,43	461,70	246,37
Agregaatori osa, €	46,97	184,68	98,55
Saadud kasum, €	70,46	277,02	147,82

Tabel 4.8 Akusalvesti allareguleerimise rahavoogude jaotus

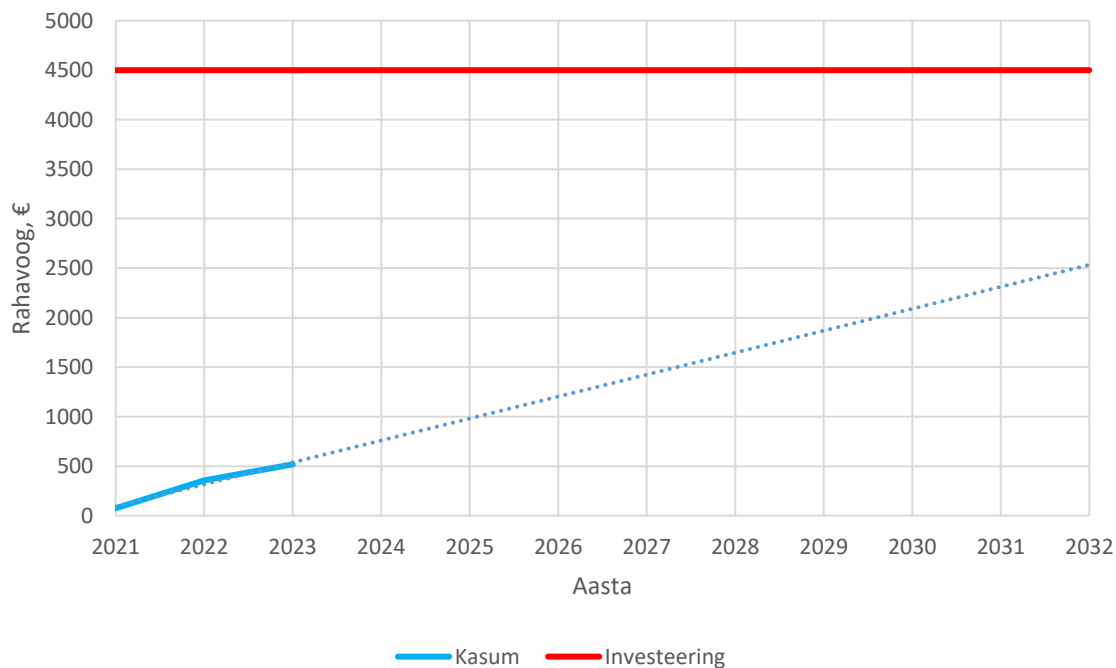
Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	7,84	6,41	24,47
Agregaatori osa, €	3,14	2,57	9,79
Saadud kasum, €	4,71	3,85	14,68

Tulemuste põhjal on võimalik välja lugeda, et bilansienergia hinnad olid kõrgeimad aastal 2022, samas kui madalaimad hinnad esinesid aastal 2021 ülesreguleerimise korral. Seega oli kõige kasumlikum teostada ülesreguleerimist aastal 2022, kui aktiveerimistest tulenev tulu oli võrreldes 2021. aastaga 293% kõrgem. Aasta 2023 osutus ülesreguleerimise seisukohast kõige optimaalsemaks, kuna bilansienergia turuhinnad olid sel aastal keskmised võrreldes 2021. ja 2022. aastaga.

Analüüsisist selgub, et allareguleerimine kasvas oluliselt aastal 2023 võrreldes kahe eelneva aastaga. 2022. aastal oli allareguleerimisest teenitud kasum kõige madalam. 2023. aastal suurenes allareguleerimisega teenitud kasum isegi 281% võrra võrreldes 2022. aastaga. Ehkki summad võivad olla väikesed, annab see siiski selge ülevaate, et 2023. aastal oli allareguleerimist vajavate perioodide arv suurem kui varasematel aastatel ning vastavalt sellele maksti rohkem.

4.2.4 Akusalvesti tasuvusaeg

Kasutades igal aastal saavutatud kasumiandmeid, saab läbi viia akusalvesti tasuvusanalüüsi, mille käigus koostatakse tasuvusaja graafik. Analüüsi aluseks on vaid kolme aasta andmed ning tuleviku bilansienergiaturu ettearvamatusse tõttu rakendatakse Excel'i "trendline" funktsiooni. Graafik katab aastad 2021-2032, eeldades tasuvusaja pikkuseks 12 aastat. Joonis 4.10 annab täpsem ülevaate tasuvusajast.



Joonis 4.10 Akusalvesti tasuvusaeg

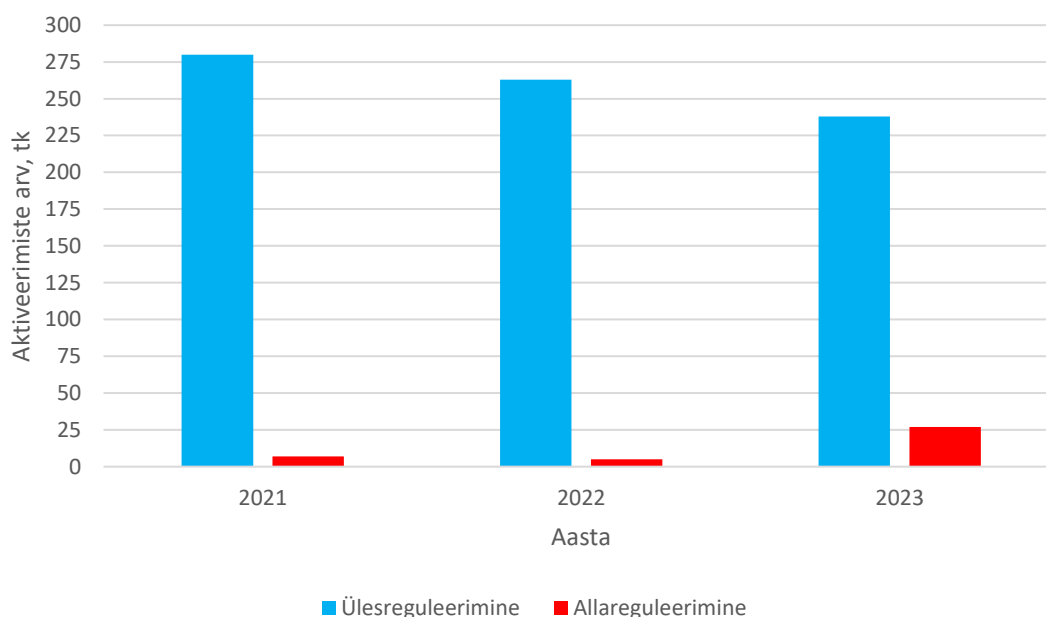
Joonis 4.10 analüüs näitab, et 12 aasta jooksul ei oleks paindlikkust pakkuv osapool tasuvusse jõudnud, vaid jäänuks kahjumisse. Kuna alginvesteering oli 4500 €, on oluline see summa 12 aasta jooksul tagasi teenida. 12. aasta lõpuks oleks bilansienergiaturul osalemine toonud 2500 € tulu pärast kõikide kulude mahaarvestamist. Bilansienergiaturul reguleerides kataks akusalvesti 55% seadme alginvesteeringust. Seega oleks vaja veel teenida 2000 €, et jõuda tasuvuspunkti. Autor märgib, et kui aktiveerimisi toimuks rohkem kui üks kord päevas, oleks suure tõenäosusega tasuvus 12 aasta jooksul saavutatud ja kasumit teenitud.

4.3 Õhksoojuspumba analüüs

Järgmises peatükis esitletakse õhksoojuspumba üles- ja allareguleerimise tulemusi. Analüüsis kasutati viimase kolme aasta (2021–2023) bilansienergiaturu mudeli andmeid ning koos hinnastamismudeli rakendamisega saadi vajalikud tulemused, et läbi viia õhksoojuspumba analüüse.

4.3.1 Üles- ja allareguleerimiste aktiveerimiste arv

Nagu veeboileri ja akusalvesti korral, seadis autor ka õhksoojuspumba aktiveerimiste puhul reegli, et seadet tohib aktiveerida vaid üks kord päevas. Kui tekkis vajadus nii üles kui alla reguleerimiseks samal tunnil, eelistati alati aega, mis teenusepakkujale suuremat tulu töö. Joonis 4.11 kaudu on esitatud tulemused, mis annavad ülevaate sellest, kui sageli oli võimalik õhksoojuspumba aktiveerida nii, et teenusepakkuja jääks kasumisse vastavalt hinnastamismudeli arvutustele.



Joonis 4.11 Õhksoojuspumba aktiveerimised aastate lõikes

Joonis 4.11 kaudu selgub, et aastal 2023 toimus kõige vähem aktiveerimisi ja kõige rohkem aktiveerimisi aastal 2021 ülesreguleerimise korral. Ehkki allareguleerimist vajati kolme aasta jooksul kõige vähem, märgati aastal 2023 märgatavalt suuremat nõudlust allareguleerimise järele. Vastupidiselt sellele olid aastatel 2021 ja 2022 allareguleerimise vajadus oluliselt madalam. Reguleerimiste arv on oluliselt vähenenud võrreldes veeboileriga, mis võib olla tingitud õhksoojuspumba koormusgraafikust. Tabel 4.9 kaudu on näidatud täpne reguleerimiste arv igal aastal.

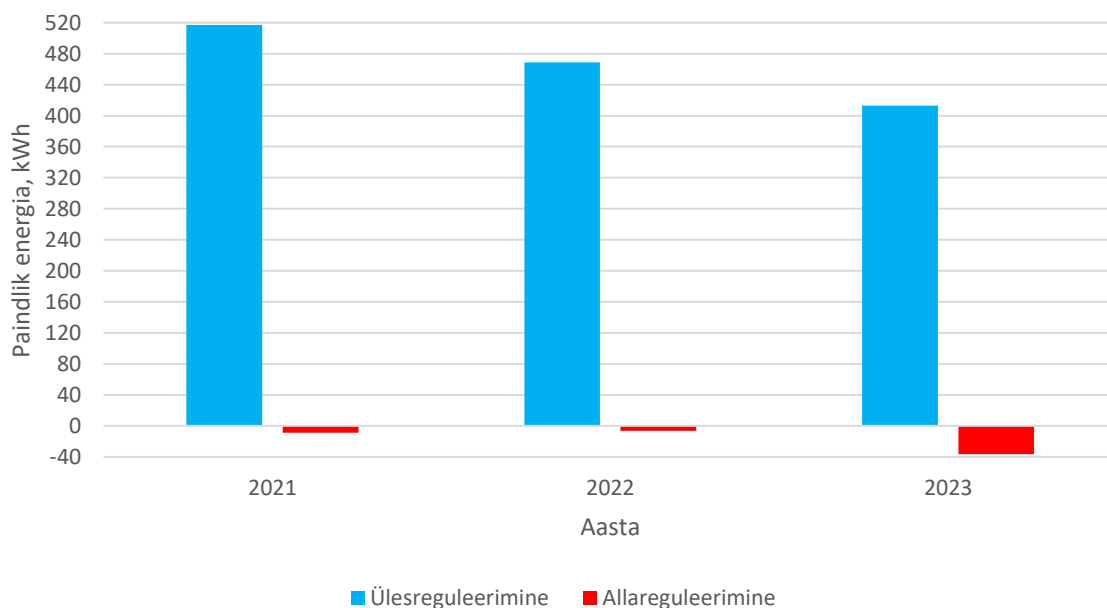
Tabel 4.9 Õhksoojuspumba aktiveerimiste arv aastate lõikes

Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimiste arv, tk	280	263	238
Allareguleerimiste arv, tk	7	5	27
Kokku, tk	287	268	265
Mitu % võimalikest aktiveerimistest	78,6%	73,4%	72,6%

Tabel 4.9 selgub, et akusalvestit oli võimalik aasta jooksul reguleerida bilansienergiaturul ligikaudu 75% juhtudest, mis muudab selle seadme vähem paindlikumaks kui veeboileri, kuna reguleerimine ei ole garanteeritud igapäevaselt. Nagu juba mainitud, on akusalvesti esialgne investeering niivõrd märkimisväärne, et see võib oluliselt mõjutada aktiveerimiste arvu.

4.3.2 Õhksoojuspumba üles- ja allareguleeritud energia kogus

Arvestades eelmise alapeatüki teavet selle kohta, kui palju aktiveerimisi oli võimalik igal aastal teha, on võimalik tuvastada reguleeritud paindlikku energiakogust, mida igal aastal saavutati. Joonis 4.12 kirjeldab seda.



Joonis 4.12 Õhksoojuspumba reguleeritud energia aastate lõikes

Joonis 4.12 analüüs näitab, et aktiveerimiste arvust tulenevalt on võimsus aastate jooksul varieeruv. Mida rohkem oli aktiveerimisi nii üles- kui ka allareguleerimisel, seda suurem oli energiakoguse reguleerimine. Näiteks aastal 2023 oli kõige rohkem aktiveerimisi allareguleerimisel, mis tõi kaasa suurima energiakoguse reguleerimise sellel aastal. Sama kehtib ka ülesreguleerimise puhul: aastal 2021 saavutati kõrgeim

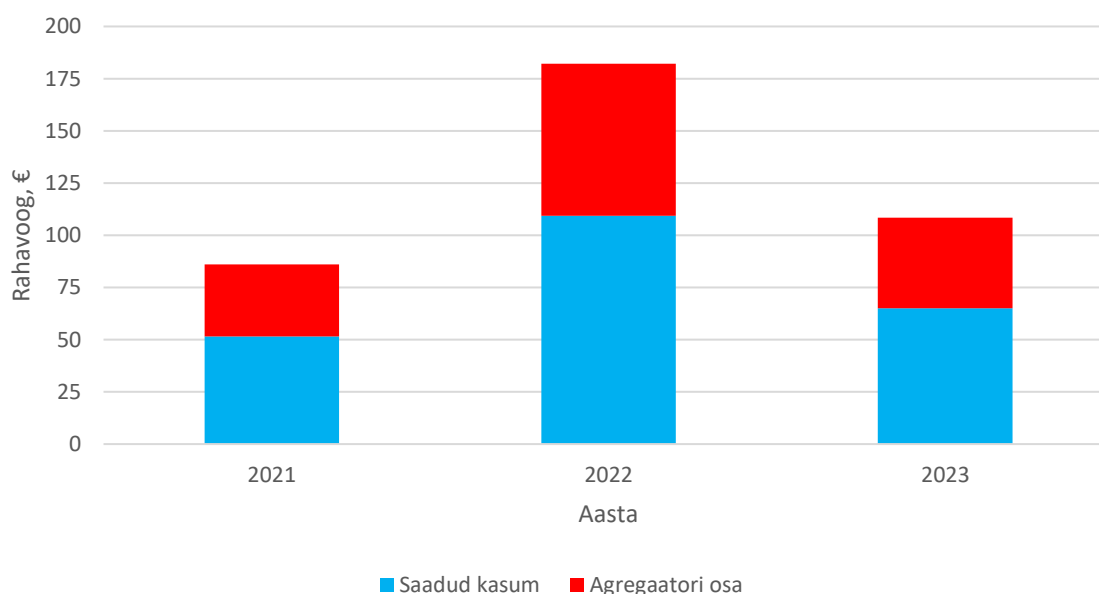
ülesreguleerimise energiatase. Tabel 4.10 kaudu on esitatud täpsed energiakogused, mis reguleeriti nii üles- kui ka allareguleerimisel igal aastal.

Tabel 4.10 Õhksoojuspumba reguleeritud energia aastate lõikes

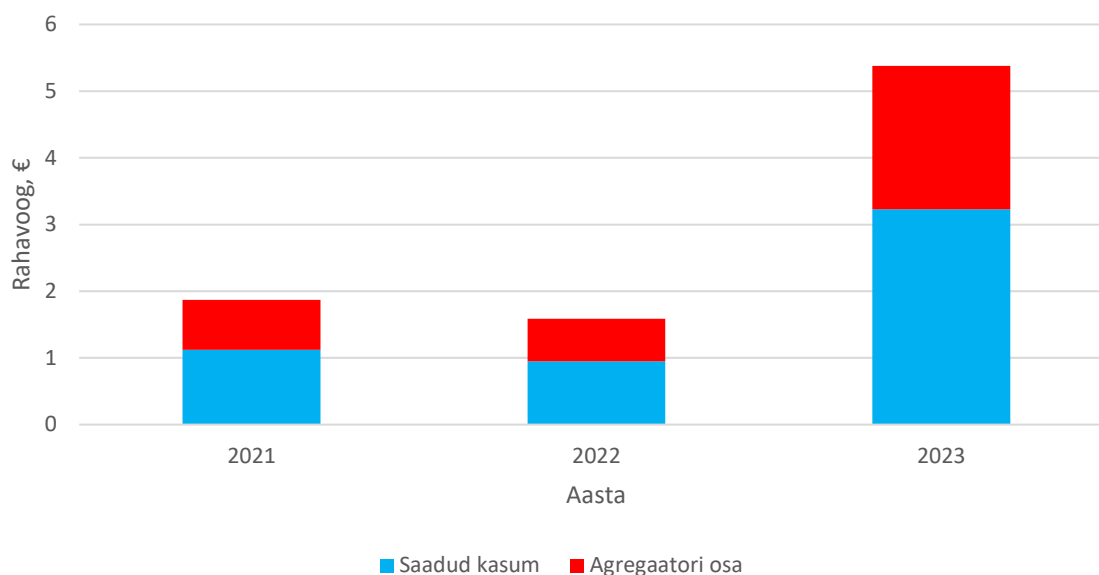
Aasta	2021	2022	2023
Ülesreguleerimine, (kWh)	517,16	468,59	412,86
Allareguleerimine, (kWh)	-8,76	-6,38	-36,71

4.3.3 Õhksoojuspumba üles- ja allareguleerimisest tulenev tulu

Kasutades eelnevates alapeatükkides esitatud teavet aktiveerimiste arvu ja reguleeritud energia kohta, on võimalik välja tuua õhksoojuspumba üles- ja allareguleerimisest saadav tulu. Tulu kajastab rahavoogu, mida reguleerimiste kaudu saadi, kuid see ei ole veel jõudnud paindlikkust pakkuvale osapoolale puhtaks kasumiks. Selleks tuleb tulu maha arvestada ka agregaatori osaga, alles siis saab rääkida tegelikust kasumist. Autor esitab kahe erineva joonise kaudu ülesreguleerimise ja allareguleerimise rahavoogude jaotust. Joonistel on võimalik välja lugeda, palju kasumit teeniti ning kui suur on agregaatori osa. Joonis 4.13 kirjeldab ülesreguleerimise rahavoogu. Joonis 4.14 kirjeldab allareguleerimise rahavoogu.



Joonis 4.13 Õhksoojuspumba ülesreguleerimise rahavoogude jaotus



Joonis 4.14 Õhksoojuspumba allareguleerimise rahavoogude jaotus

Sarnaselt veeboileri ja akusalvestile, siis õhksoojuspumba kaudu saab reguleerimise eest agregator endale 40% teenitud tulust, jättes reguleerimisteenust pakkuvale osapoolle lõpuks 60% kogu teenitud kasumist. Tabel 4.11 kirjeldab ülesreguleerimise täpset rahavoogude summasid. Tabel 4.12 kirjeldab allareguleerimise täpset rahavoogude summasid.

Tabel 4.11 Õhksoojuspumba ülesreguleerimise rahavoogude jaotus

Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	86,02	182,170	108,37
Agregaatori osa, €	34,41	72,87	43,35
Saadud kasumi, €	51,61	109,30	65,02

Tabel 4.12 Õhksoojuspumba allareguleerimise rahavoogude jaotus

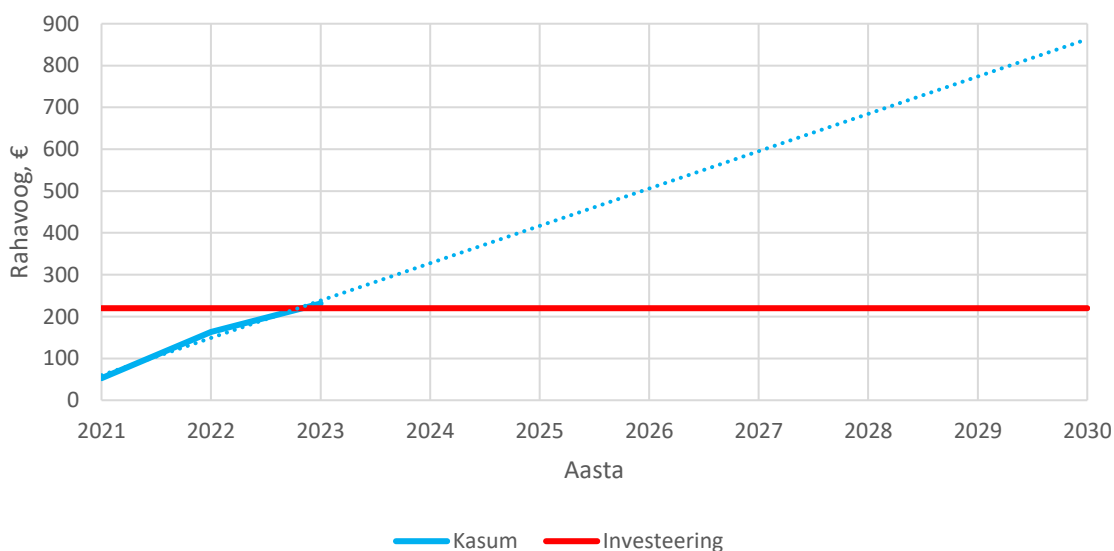
Aasta	2021	2022	2023
Teenitud tulu, €	1,87	1,58	5,38
Agregaatori osa, €	0,75	0,63	2,15
Saadud kasumi, €	1,12	0,95	3,23

Tulemuste põhjal on näha, et bilansienergia hinnad olid kõrgeimad aastal 2022, samas kui madalaimad hinnad esinesid aastal 2021 ülesreguleerimise korral. Seega oli kõige kasumlikum teostada ülesreguleerimist aastal 2022, kui aktiveerimistest tulenev tulu oli võrreldes 2021. aastaga 111% kõrgem. Aasta 2023 osutus ülesreguleerimise seisukohast kõige optimaalsemaks, kuna bilansienergia turuhinnad olid sel aastal keskmised võrreldes 2021. ja 2022. aastaga.

Tulemuste põhjal saab järeldada, et allareguleerimine kasvas oluliselt aastal 2023 võrreldes kahe eelneva aastaga. 2022. aastal oli allareguleerimisest teenitud kasum madalaim. 2023. aastal suurenes allareguleerimisega teenitud kasum isegi 240% võrra võrreldes 2022. aastaga. Kuigi summad võivad olla väikesed, annab see siiski selge ülevaate, et 2023. aastal oli allareguleerimist vajavate perioodide arv suurem kui varasematel aastatel ning vastavalt sellele maksti rohkem.

4.3.4 Õhksoojuspumba tasuvusaeg

Kasutades igal aastal saadud kasumandmeid, saab läbi viia õhksoojuspumba tasuvusanalüüsi ning koostada tasuvusaja graafiku. Analüüsi aluseks on vaid kolme aasta andmed ning arvestades tuleviku bilansienergiaturu ettearvamatus, kasutatakse Excel'i "trendline" funktsiooni. Graafik hõlmab aastaid 2021-2030, kus eeldatav tasuvusaeg on 10 aastat. Joonis 4.15 annab täpsema ülevaate tasuvusajast.



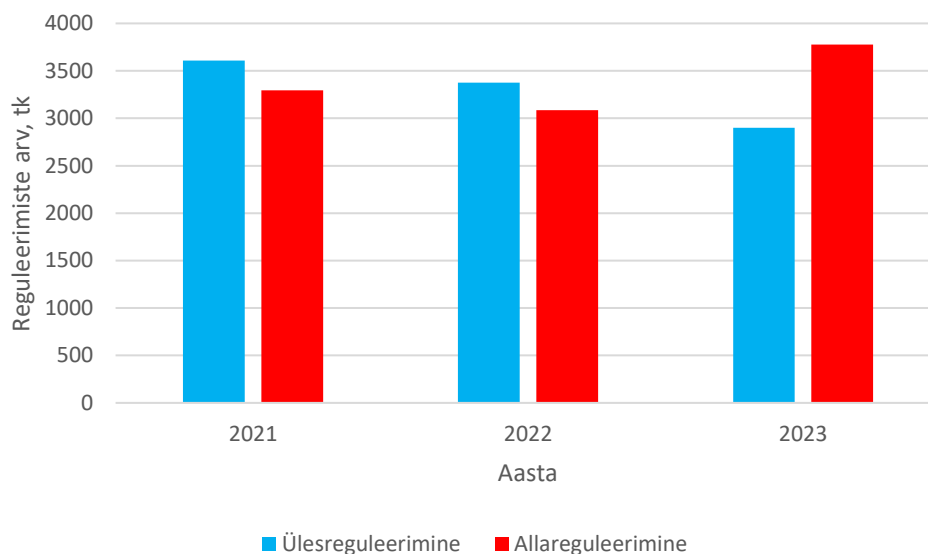
Joonis 4.15 Õhksoojuspumba tasuvusaeg

Joonis 4.15 kaudu on selgesti näha, et õhksoojuspumba tasuvusaeg saabub väga varakult - juba 2023. aasta lõpuks. Selleks ajaks on kogu alginvesteering tagasi teenitud, võimaldades paindlikkust pakkujal tulevikus puhaskasumit teenida. Kuna analüüs hõlmab kümneaastast perioodi, siis prognoositakse, et aastaks 2030 on kogutud rahavoog ligikaudu 900 eurot. Pärast alginvesteeringu mahaarvamist jääb paindlikkust pakkujale puhtalt kasumiks 680 eurot.

Siinkohal tuleb kindlasti märkida, et selles töös ei lisatud õhksoojuspumba enda seadme hinnangulist maksumust juurde. Autor eeldab, et see on juba tasutud paindlikkust pakkujal, kuna sellised seadmed on tänapäeval väga populaarsed.

4.4 Reguleerimist vajavad hetked

Autor oli teinud analüüsi, kui palju läks kõigi kolme aasta jooksul tarvis reguleerimist bilansienergiaturul. Autor luges kokku kõik hetked, millal oli võimsus suurem kui 0, ehk siis nendel hetkedel oli tarvis reguleerimist teostada. Joonis 4.16 kirjeldab järgnevalt:



Joonis 4.16 Bilansienergiaturul reguleerimist vajavad hetked

Joonis 4.16 põhjal selgub, et ülesreguleerimist vajati kõige rohkem aastal 2021. Kuigi aastal 2022 oli veidi vähem reguleerimisi, siis selle arvelt olid hinnad kõige kõrgemad kõigi kolme aasta vahel, kuna varasemalt selgus, et paindlikud seadmed teenisid kõige rohkem tulu just aastal 2022.

Allareguleerimist läks kõige vähem aastal 2022 ning aastal 2023 kõige rohkem just. See seletab ka olukorra ära, miks allareguleerimist toimus kõige rohkem just aastal 2023. Järgnevalt toob autor esile tabeli, kus on toodud välja numbriliselt kõik aktiveerimist vajavad hetked aastate lõikes. Tabel 4.13 kirjeldab seda.

Tabel 4.13 Bilansienergiaturul reguleerimist vajavad hetked

Aasta	Ülesreguleerimiste arv, (tk)	Allareguleerimiste arv, (tk)
2021	3609	3296
2022	3375	3084
2023	2901	3776

5. PAINDLIKE SEADEMETE POTENTSIAAL EESTIS JA JÄRELDUSED

Järgmises peatükis esitatakse ülevaade analüüsitud paindlike seadmete potentsiaalset Eestis, sealhulgas nende arvust ja koguvõimsusest. Analüüsi alla lähevad veeboiler, akusalvesti ja õhksoojuspump. Selle teabe põhjal on võimalik hinnata, kui palju energiat oleks võimalik bilansienergiaturul ühes tunnis reguleerida, kui kõik need seadmed korraga aktiveerida. Autor rõhutab, et tegemist on ligikaudse hinnanguga ega ole täpne arvutus.

IEA andmebaasi põhjal ulatus Eesti maksimaalne energiatarbimine aastal 2022 terve aasta jooksul 9,4 TWh-ni [27]. MWh teisendades oleks selle väärtus 9 400 000 MWh. Autor soovib lisaks leida aastas keskmise tunni tarbimise jagades eelmise väärtuse 8760-ga. Arvutus näitab, et Eestis keskmiselt tunnis tarbitakse 1073 MWh.

5.1.1 Veeboileri potentsiaal

2023 aasta alguses oli Eestis ligikaudu 220 000 elektri boilerit [28]. Autor käsitleb neid kõiki veeboilerina. Konsulteerides veeboilerite müügi konsultantidega, selgus et populaarseimad veeboilerid on 2 kW nii nagu oli varasemalt analüüsi teostatud. Vastavalt nendele andmetele on võimalik välja arvutada kogu võimsus kõigi veeboileritel. Lihtsustatud arvutuse käigus korrutatakse nimivõimsus seadmete arvuga. Seda kirjeldab allolev valem (5.1).

$$P_{max} = n \cdot P_n \quad (5.1)$$

Kus:

P_{max} - potentsiaalne maksimaalne võimsus,

n - seadmete arv,

P_n - seadme nimivõimsus.

Kasutades antud valemit, leiab autor maksimaalse koguvõimsuse:

$$P_{max} = 220\,000 \cdot 2 = 440\,000 \text{ kW} = 440 \text{ MW}$$

Valemi põhjal selgub, et kui kõiki seadmeid reguleerida üheaegselt, on võimalik tunni aja jooksul reguleerida 440 MWh. Antud väärtus on illustratiivne ning ei kajasta reaalselt

olukorda, kuna see on lihtsustatud arvutuskäik. Lisaks tuleb meeles pidada, et see oleks maksimaalne võimsus, mida oleks võimalik reguleerida kõiki seadmeid üheaegselt.

5.1.2 Akusalvesti potentsiaal

2023 aastal oli Eestis ligikaudu 11 822 mikrotootjat [29]. Kuna akusalvestit ei paigaldata üldiselt ilma tootmisjaamata, oletab autor et koos tootmisjaamadega on paigaldatud samuti ka akusalvestid. Kuna mikrotootja maksimaalne võimsus on 15 kW ning akusalvesti minimaalne võimsus on 5 kW, valib autor keskmise väärtuse ehk siis 10 kW võimsusega akusalvestid, mis on veidi suurema võimsusega, kui analüüsis kasutatud akusalvestit. Vastavalt nendele andmetele on võimalik välja arvutada kogu salvestatud võimsus mida on võimalik reguleerida. Lihtsustatud arvutuse käigus korrutatakse nimivõimsus seadmete arvuga.

Kasutades valemit (5.1), leiab autor maksimaalse koguvõimsuse:

$$P_{max} = 11\,822 \cdot 10 = 118\,220 \text{ kW} \approx 119 \text{ MW}$$

Valemi põhjal selgub, et kui kõiki seadmeid reguleerida üheaegselt, on võimalik tunni aja jooksul reguleerida 119 MWh. Antud väärtus on illustratiivne ning ei kajasta reaalselt olukorda, kuna see on lihtsustatud arvutuskäik. Lisaks tuleb meeles pidada, et see oleks maksimaalne võimsus, mida oleks võimalik reguleerida kõiki seadmeid üheaegselt.

5.1.3 Õhksoojuspumba potentsiaal

2023 aasta alguses oli Eestis ligikaudu 100 000 soojuspumpa [30]. Autor käsitleb neid kõiki õhksoojuspumbana. Konsulteerides õhksoojuspumba müügi konsultantidega, selgus et populaarseimad õhksoojuspumbad on üldiselt 5 kW, mis on veidi suurema võimsusega, kui analüüsis kasutatud õhksoojuspump. Vastavalt nendele andmetele on võimalik välja arvutada kogu võimsus kõigi õhksoojuspumpadel. Lihtsustatud arvutuse käigus korrutatakse nimivõimsus seadmete arvuga.

Kasutades valemit (5.1), leiab autor maksimaalse koguvõimsuse:

$$P_{max} = 100\,000 \cdot 5 = 500\,000 \text{ kW} = 500 \text{ MW}$$

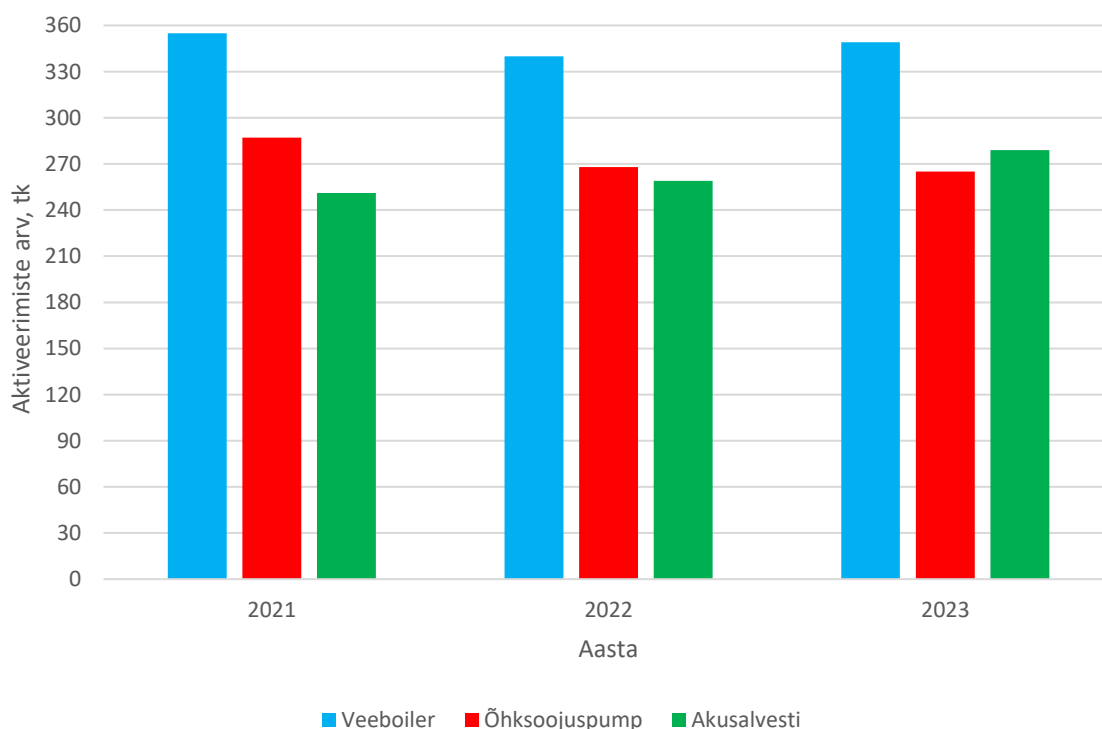
Valemi põhjal selgub, et kui kõiki seadmeid reguleerida üheaegselt, on võimalik tunni aja jooksul reguleerida 500 MWh. Antud väärtus on illustratiivne ning ei kajasta reaalselt olukorda, kuna see on lihtsustatud arvutuskäik. Lisaks tuleb meeles pidada, et see oleks maksimaalne võimsus, mida oleks võimalik reguleerida kõiki seadmeid üheaegselt.

5.2 Järeldused

Katseid teostati kolmele seadmele: veeboiler, akusalvesti ja õhksoojuspump. Iga seadme puhul esines mõningaid sarnasusi ja samas ka erinevusi. Seepärast on koostatud ülevaated iga kolme paindliku seadme kohta, esitades jooniste kujul võrdluse seadmete teenitavast kasumist, aktiveerimiste arvust ning reguleeritud energia kogusest aastate lõikes. Lõpus tuuakse esile lühidalt ja detailselt iga stsenaariumi kohta omad plussid ja miinused, mis on toodud välja tabeli kujul. Autori hinnangul olid simulatsiooni tulemused reaalsed ja aktsepteeritavad.

5.2.1 Paindlike seadmete aktiveerimised

Peatükis 4 läbi viidud analüüsi põhjal on koostatud kokkuvõtte, mis kajastab kõikide seadmete aktiveerimiste arvu aastate lõikes. Seekord on arvesse võetud nii üles- kui ka allareguleerimise tulemused, vaadeldes neid ühtse tervikuna. Joonis 5.1 kujul on esitatud veeboileri, õhksoojuspumba ja akusalvesti aastaste aktiveerimiste koguarvud.

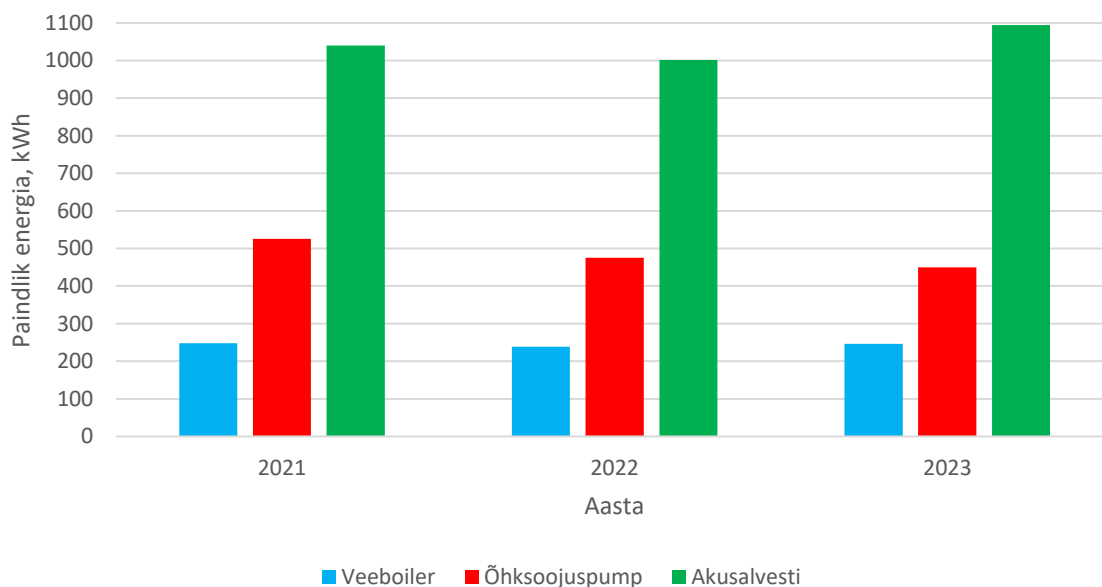


Joonis 5.1 Kolme paindliku seadme aktiveerimiste arv aastate lõikes

Tulemused näitavad, et kõige sagedamini aktiveeriti veeboilerit kolme seadme hulgas. Aastatel 2021 ja 2022 registreeriti õhksoojuspumbal rohkem aktiveerimisi kui akusalvestil. Seevastu 2023. aastal oli akusalvesti aktiveerimiste arvult õhksoojuspumbast eespool.

5.2.2 Painslike seadmete reguleeritud energia

Peatükis 4 läbi viidud analüüsi põhjal on koostatud kokkuvõte, mis kajastab kõikide seadmete reguleeritud energia kogust aastate lõikes. Nagu aktiveerimiste arvu puhul siis ka energia puhul on arvesse võetud nii üles- kui ka allareguleerimise tulemused, vaadeldes neid ühtse tervikuna. Joonis 5.2 kujul on esitatud veeboileri, õhksoojuspumba ja akusalvesti aastaste reguleeritud energia kogused.

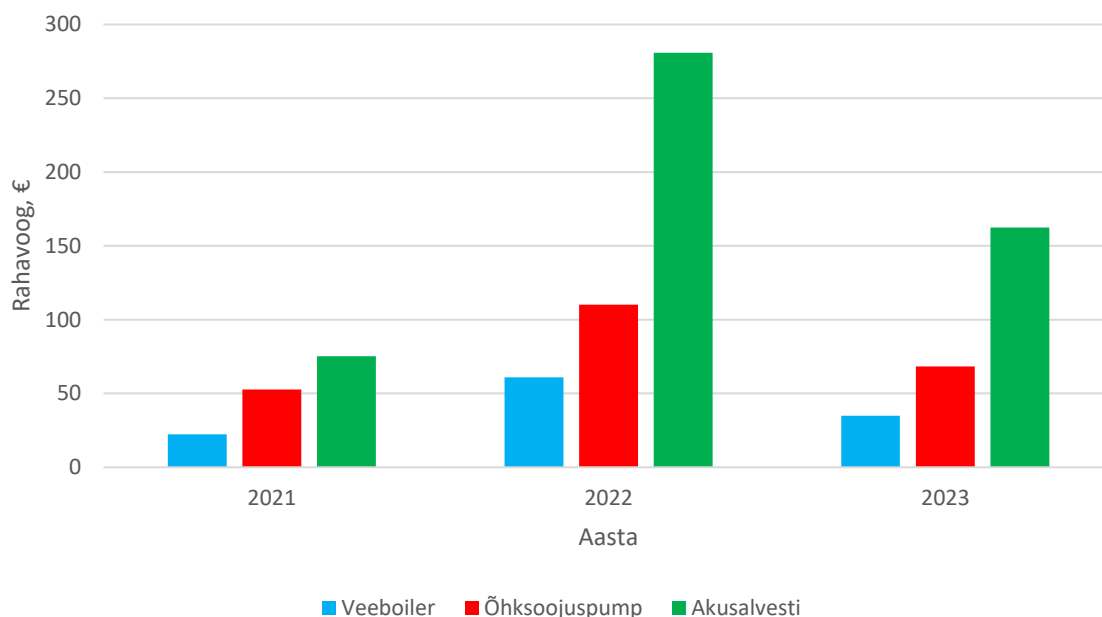


Joonis 5.2 Kolme painsliku seadme reguleeritud energia aastate lõikes

Tulemustest selgub, et seadmete nimivõimsused määravad nende energia reguleerimise võimekuse. Akusalvesti, mis omab suurimat nimivõimsust, reguleeris ka kõige suuremas koguses energiat. Õhksoojuspump, mis on nimivõimsuselt teisel kohal, reguleeris üle kahe korra vähem energiat kui akusalvesti. Kõige vähem energiat reguleeriti veeboileri kaudu, mille nimivõimsus on kõige väiksem.

5.2.3 Painslike seadmete teenitav kasum

Peatükis 4 läbi viidud analüüsi põhjal on koostatud kokkuvõte, mis kajastab kõikide seadmete teenitud kogukasumit aastate lõikes. Nagu aktiveerimiste arvu ja reguleeritud energia puhul siis ka puhaskasumi puhul on arvesse võetud nii üles- kui ka allareguleerimise tulemused, vaadeldes neid ühtse tervikuna. Joonis 5.3 kujul on esitatud veeboileri, õhksoojuspumba ja akusalvesti aastate lõikes teenitud kasumi rahavood.



Joonis 5.3 Kolme paindliku seadme teenitav kasum aastate lõikes

Tulemustest selgub, et kõige suuremad kasumi rahavood olid aastal 2022. Samuti on oluline märkida, et 2021. aastal teeniti kõige vähem kasumit. 2023. aastaks on bilansienergiaturu hinnad stabiliseerunud, lähenedes taas 2021. aasta tasemele. Vastavalt reguleeritud võimsusele, on märgata vastavalt ka kasumit, kuna reguleeritud võimsuse pealt tasutakse paindlikkust pakkujale.

5.2.4 Paindlike seadmete plussid ja miinused

Edasi saab autor esile tuua kõigi käsitletud paindlike seadmete eelised ja puudused, mis on esitatud tabelis. Tabel 5.1 kirjeldab kõikide seadmete positiivseid ja negatiivseid omadusi.

Tabel 5.1 Erinevate seadmete võrdlus, kus on välja toodud plussid ja miinused

Seade	Plussid	Miinused
Veeboiler	Kõige rohkem aktiveerimisi aastate lõikes; saavutatakse tasuvusaeg viiendaks aastaks	Kõige väiksem tulu reguleerimisest; reguleeritud energiakogus kõige väiksem
Akusalvesti	Kõige suurem arv aktiveerimisi allareguleerimisel; kõige suurem energiakogus allareguleerimisel	Kõige vähem aktiveerimisi aastate lõikes; ei saavutata tasuvusaega valitud aja jooksul
Õhksoojuspump	Saavutatakse tasuvus üsna varakult; kõige suurem kasumi teenimine	Aktiveerimiste arv palju väiksem kui veeboileril, kuigi maksumus on väga sarnane; kõige väiksem kasum allareguleerimisel

Antud uuringus selgub, et kõige vähem tasuvamaks seadmeks osutus akusalvesti. Selle põhjuseks oli kõrge algne investeeringu maksumus, mis ei võimaldanud saavutada nominaalset tasuvust ettenähtud perioodi jooksul ning samuti ei teeniks paindlikkust pakkuja puhaskasumit. Siiski, kui vaadelda võimalikke stsenaariume, kus aktiveerimisi võib teostada rohkem kui üks kord päevas, võib tulemus olla märksa soodsam. Autor oli seadnud antud tingimuse, et võrdselt käsitleda seadmete aktiveerimisi kõigi kolme seadme puhul.

Järgnevalt toob autor esile, et veeboiler osutus selles uuringus aktiveerimiste arvu poolest kõige soodsamaks valikuks. Praktiliselt igapäevaselt on võimalik vähemalt üks kord päevas aktiveerida veeboiler, tagades kasutaja mugavuse, kuna veetemperatuur hoitakse stabiilselt ettenähtud vahemikus. Kuigi veeboilerit sai kõige rohkem aktiveerida, on märgata, kui suurt rolli mängib ikkagi seadme nimivõimsus ning kuna kõikidest seadmetest oli veeboiler kõige vähem võimsam, oli reguleeritud energia kogus kõige väiksem, mis kaasas kõige väiksema rahavoo. Positiivne aspekt selles on, et alginvesteering veeboilerisse oli võrreldes akusalvestiga ligi 20 korda odavam, mis tähendas, et tasuvus saavutati juba viiendaks aastaks, võimaldades teenida puhaskasumit juba varakult.

Õhksoojuspump osutus selles uurimuses kõige tasuvamaks seadmeks. Sellel oli madal algne investeering nagu veeboileri puhul. Õhksoojuspumba alginvesteering oli 10 eurot odavam kui veeboileri puhul ning lisaks võimsus oli veidike suurem. Tulemustest selgus, et sellest piisas, et saavutada kõige kiiremini tasuvusaeg. Õhksoojuspumbal saavutati tasuvusaeg kolme aastaga.

Kuigi aktiveerimisi oli palju vähem kui veeboileri puhul, julgeb autor oletada, et õhksoojuspump aktiveerus parematel aegadel bilansienergiaturul. See soodustas kõrgemat rahavoogu, mis omakorda kompenseerib kiiremat tasuvust ja paindlikkust pakkuva isik saab hakata teenima kasumit kiiremini. Lisaks võis põhjuseks olla ka õhksoojuspumba aktiveerimise kestvus, kuna analüüsist selgus, et veeboilerit aktiveeriti oluliselt rohkem kui õhksoojuspumba. Erinevus võib tuleneda sellest, et veeboilerit lülitati sisse või välja lühema perioodi jooksul, et tagada kasutaja mugavus.

Autor soovib rõhutada, et tasuvusanalüüs põhineb kolm aastat tagasi kogutud andmetel. Seega võib tulevikus bilansienergiaturg oluliselt muutuda, olgu siis paremaks või halvemaks, ent autor ei saa seda ennustada. Lisaks tuleb mainida, et kuna autoril on võimalik analüüsida mineviku andmeid, siis valiti alati kõige kasumlikumad hetked. Kuna reaalses olukorras ei ole võimalik ennustada tulevaste bilansienergiaturu hindade kõikumisi, võivad aktiveerimised toimuda vähem kasumlikel aegadel, mis omakorda vähendab tulu ning viib tasuvuseni aeglasemalt.

Lisaks toob autor esile, et tasuvus võib olla parem kui arvestatakse hinnapõhist juhtimist Nordpooli börsihinna järgselt. See tähendab, et kui võtta arvesse reaalselt elektri hinna dünaamikat turul, võivad investeeringud koduseadmetesse osutuda veelgi kasumlikumaks kui esialgu arvatud.

Tulevikus peaksid need, kes on huvitatud paindlikkuse pakkumisest koduseadmete abil, põhjalikult tutvuma erinevate agregaatrite hinnakirjadega, et sõlmida võimalikult soodsate tingimustega leping. Lepingu oluliseks aspektiks on madala vahendustasu kindlustamine, mida agregaatror iga tegevuse eest võtab. See on kriitilise tähtsusega, kuna see määrab, kui kiiresti ja kui palju tulu paindlikkuse pakkuja igast reguleerimist vajavast aktiveerimisest teenib.

Järgmise soovitusena tuleks arvestada investeeringu suurust. Kui kodus on juba olemas paindlik seade ja soovitakse hakata paindlikkust pakkuma, on see suurepärase võimalus, sest esialgne investeeringu kulu jääb madalaks. Kui aga sobiv seade puudub, peaks potentsiaalne paindlikkuse pakkuja hoolikalt kaaluma, kui sageli on tal plaanis seadet aktiveerida, et tagada investeeringu tasuvus.

Viimase soovitusena soovib autor esile tuua, et kasutaja peab enda jaoks tegema selgeks, kui palju ta oleks valmis päevas aktiveerimisi tegema. Ülemääraste aktiveerimiste korral võib tekkida mugavustsooni rikkumise oht, seega on oluline läbi mõelda, milline oleks maksimaalne aktiveerimiste arv, mida ollakse valmis tegema, et aidata kaasa Eesti võrgu tasakaalustamisele.

KOKKUVÕTE

Taastuenergia osakaalu suurenemine toob elektrisüsteemile kaasa väljakutseid, eriti seoses tarbimise ja tootmise tasakaalu säilitamisega, kuna taastuenergia ennustamine pole lihtne. Lisaks võib taastuenergia Eesti jaotusvõrgus põhjustada ülepinge probleeme, mis omakorda võivad suurendada kodude ja tööstuste energiakulu ning põhjustada seadmete rikkeid ja tõrkeid.

Üks võimalik lahendus elektrisüsteemi väljakutsetele on energiapaindlikkusteenuse pakkumine, kus hoonetes asuvad elektrienergia tarbijad kohandavad tarbimist vastavalt süsteemi vajadustele, et kompenseerida puudujääke ja tagada stabiilsus. See lähenemine võimaldab vältida kulukaid võrgu tugevdamise töid, nagu kaablite, mastide ja alajaamade väljavahetamine, ning odavamalt suurendada elektrisüsteemi paindlikkust tarbimise juhtimise kaudu, kasutades näiteks koduseadmete, hoonete kütmise, vee soojendamise ja elektritootmise juhtimist.

Magistritöö esimeses osas antakse põgus ja teoreetiline ülevaade, millised on paindlikud seadmed kodumajapidamistes ning mis rolli nad mängivad energiapaindlikkuse pakkumisel.

Teises osas esitatakse hinnastamismudel, mis võimaldab jätkata uuringut agregeeritud juhtimise valdkonnas. Mudelis esitatakse valem, mis arvutab iga tunni hinda, millal oleks paindlikkust pakkujal kasumlik aktiveerimisi teostada, et mitte jääda kahjumisse.

Töö põhiosa keskendus simulatsioonide tulemuste töötlemisele *Excel*'is, kus andmed tuli kohandada vastavaks bilansienergiaturu mudeli tunnipõhiste andmetele. Pärast põhjalikku simuleerimist hinnastamismudeli ja bilansienergiaturu hindadega oli autoril võimalik filtreerida parimad tulemused 24-tunnise perioodi kaupa üles- ja allareguleerimisel. Saadud tulemuste põhjal koostati graafilised analüüsid koos tabelitega. Lisaks toodi esile tasuvusanalüüs, mis oli teostatud kolme aasta andmete põhise ennustuse põhjal.

Töö viimases peatükis koostati tabel, mis andis lühikese ja põhjaliku ülevaate kõigist analüüsis käsitletud seadmetest. Tabelis toodi esile iga seadme eelised ja puudused ning hinnati, kuidas iga seade täitis eesmärgi paindlikkust pakkumisel. Autor jagas lõpus soovitusi, mida tuleks paindlikkuse pakkumisel järgida tulevikus.

Autor veendus, et töö eesmärk on saavutatud, kuna suudeti analüüsida kõigi seadmete rolli ja mõju paindlikkuse pakkumisel ning hinnata iga seadme tasuvust. Igal seadmel olid omad eripärad, mis muutsid antud analüüsi lugejate jaoks huvitavamaks.

Töö edasiarendamiseks oleks võimalik läbi viia reaalseid katseid ja võrrelda tegelikke tulemusi, et hinnata, kui efektiivselt inimesed suudavad aktiveerimisi teostada, et saavutada tasuvust. Kuna käesolev lõputöö keskendus varasemate aastate parimatele tulemustele, võivad tegelikud tulemused olla märksa muutlikumad.

SUMMARY

The increase in the share of renewable energy brings challenges to the electrical system, particularly concerning the balance between consumption and production, as predicting renewable energy is not straightforward. Additionally, renewable energy in the Estonian distribution grid can cause overvoltage issues, which in turn may increase energy consumption for homes and industries and lead to equipment failures and disruptions.

One potential solution to the challenges of the electrical system is offering energy flexibility services, where consumers adjust their consumption according to the system's needs to compensate for deficiencies and ensure stability. This approach helps avoid costly network reinforcement works, such as replacing cables, masts, and substations, and more affordably increases the flexibility of the electrical system through consumption management, utilizing household appliances, heating buildings, water heating, and electricity generation control.

The first part of the master's thesis provides a brief and theoretical overview of flexible devices in households and their role in providing energy flexibility.

In the second part, a pricing model is presented, allowing further research in the field of aggregated management. The model includes a formula to calculate the hourly price at which it would be profitable for a flexibility provider to perform activations to avoid losses.

The main part of the work focuses on processing simulation results in *Excel*, where the data had to be adjusted to match the hourly data of the energy balance market model. After thorough simulation with pricing model and energy balance market prices, the author was able to filter the best results for up- and down-regulation in 24-hour periods. Based on these results, graphical analyses with tables were conducted. Additionally, a profitability analysis was highlighted, based on a prediction using three years of data.

The final part of the work presents a table that gives a brief and comprehensive overview of all the devices discussed in the analysis. Each device's advantages and disadvantages are highlighted in the table, and the fulfillment of objectives in providing flexibility is assessed for each device. Finally, the author provides recommendations for future flexibility providers.

The author ensured that the goal of the work was achieved by analyzing the role and impact of all devices in providing flexibility and evaluating the profitability of each device. Each device had its own characteristics that made the analysis more engaging for the readers.

For further development of the work, it would be possible to conduct real experiments and compare actual results to assess how effectively people can perform activations to achieve profitability. Since this thesis focused on the best results from previous years, actual results may vary significantly.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Elering, „Kas 2030. aasta taastuvelektri eesmärgi saavutamiseks jääb elektrivõrk pudelikaelaks?“. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: ["https://www.elering.ee/sites/default/files/public/blogi/4_Energeetika%20eri_20240222_.pdf"](https://www.elering.ee/sites/default/files/public/blogi/4_Energeetika%20eri_20240222_.pdf)
- [2] ERR, „Argo Rosin: energeetika vajab operatiivset ja arukat tegutsemist“. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.err.ee/1608810223/argo-rosin-energeetika-vajab-operatiivset-ja-arukat-tegutsemist>
- [3] ECOFYS, “Flexibility options in electricity systems”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/Ecofys.pdf>
- [4] NationalgridESO, “Introduction to energy system flexibility What is flexibility and why do energy systems need it?“. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.nationalgrideso.com/document/189851/download>
- [5] U. T. Salman, S. Shafiq, F. S. Al-Ismaail, and M. Khalid, “A Review of Improvements in Power System Flexibility: Implementation, Operation and Economics,” *Electronics* 2022, Vol. 11, Page 581, vol. 11, no. 4, p. 581, Feb. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11040581.
- [6] H. Li, Z. Wang, T. Hong, and M. A. Piette, “Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications,” *Advances in Applied Energy*, vol. 3, p. 100054, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ADAPEN.2021.100054.
- [7] M. Feldhofer and W. M. Healy, “Improving the energy flexibility of single-family homes through adjustments to envelope and heat pump parameters,” *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102245, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102245.
- [8] H. Li, Z. Wang, T. Hong, and M. A. Piette, “Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications,” *Advances in Applied Energy*, vol. 3, p. 100054, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ADAPEN.2021.100054.
- [9] Drax, “7 flexible electrical assets you might not know about”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://energy.drax.com/insights/flexible-electric-assets/>
- [10] CREDS, “Summary of findings from heat pump flexibility expert workshop”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.creds.ac.uk/publications/summary-of-findings-from-heat-pump-flexibility-expert-workshop/>
- [11] Aceee, “Demand Flexibility of Water Heaters”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.aceee.org/policy-brief/2023/08/demand-flexibility-water-heaters>

- [12] B. Biegel, P. Andersen, J. Stoustrup, M. B. Madsen, L. H. Hansen, and L. H. Rasmussen, "Aggregation and Control of Flexible Consumers – A Real Life Demonstration," IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, no. 3, pp. 9950–9955, Jan. 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00718.
- [13] Eurelectric, "Flexibility and Aggregation Requirements for their interaction in the market". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.usef.energy/app/uploads/2016/12/EURELECTRIC-Flexibility-and-Aggregation-jan-2014.pdf>
- [14] C. Eid, P. Codani, Y. Chen, Y. Perez, and R. Hakvoort, "Aggregation of demand side flexibility in a smart grid: A review for European market design. 2015, doi: 10.1109/EEM.2015.7216712i.
- [15] Next, "What are Balancing Services?". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/balancing-services>
- [16] Nano Energies, "Manual Frequency Restoration Reserve (mFRR)". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://nanoenergies.eu/knowledge-base/manual-frequency-restoration-reserve-mfrr>
- [17] Maask, V. (2023). Research and Development of Explicit Demand Flexibility Management Methods for Ventilation Systems [TalTech Press]. <https://doi.org/10.23658/taltech.70/2023>
- [18] Elering, "Elektrisüsteemi bilansi tagamise (tasakaalustamise) eeskirjad". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/2022-11/Elektris%C3%BCsteemi%20bilansi%20tagamise%20ehk%20tasakaalustamise%20eeskirjad_0.pdf
- [19] Elering, "Baltic Load-Frequency Control block concept document". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/2020-09/Baltic%20Load-Frequency%20Control%20concept%20document_0.pdf
- [20] Elering, "Sünkroniseerimine, Bilansivastutus ja -turud". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/2020-01/Marie%20Kalmet_17122019.pdf?fbclid=IwAR1GeVO9RJoFHI-j2RXDZiUjU93KmZAs9jnTOBAe6E52jRWcJ0mubzYrJiA
- [21] Elering, "Balti bilansiturg". Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.elering.ee/balti-bilansiturg>
- [22] B. Kumaran Nalini, Z. You, M. Zade, P. Tzscheuschler, and U. Wagner, "OpenTUMFlex: A flexibility quantification and pricing mechanism for prosumer participation in local

- flexibility markets,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 143, p. 108382, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.IJEPES.2022.108382.
- [23] K. Torolsan, I. Bianchini, and A. Sauer, “Dynamic Energy Flexibility Pricing for Industrial Energy Systems,” 2023 IEEE 11th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2023, pp. 201–205, 2023, doi: 10.1109/SEGE59172.2023.10274594.
- [24] Elektrilevi, “Võrgupaketid”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://elektrilevi.ee/et/vorguleping/vorgupaketid/korter>
- [25] Solar choice, “Solar Battery Costs – Are They Worth It?”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.solarchoice.net.au/solar-batteries/is-home-battery-storage-worth-it/>
- [26] Baltic Transparency Dashboard, “Normal activations - mFRR”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://baltic.transparency-dashboard.eu/node/36>
- [27] IEA, “Energy Statistics Data Browser”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=ESTONIA&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>
- [28] TööstusEST, “Futugrid: koduste kütteseadmete elektritarbimist saab lihtsasti juhtida”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://toostusest.ee/uudis/2023/02/22/futugrid/>
- [29] Elektrilevi, “2023. aasta tootmisrekordid Elektrilevi võrgus”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: <https://elektrilevi.ee/et/uudised/2023-aasta-tootmisrekordid-elektrilevi-vorgus>
- [30] Kliimamarket, “Õhksoojuspumpade müüdi purustaja”. Accessed: April 29, 2024. [Online]. Available: https://kliimamarket.ee/uudised/ohksoojuspumpade-muudipurustaja?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMATAAR12fqUpq5mLn6aGcXBhIB7h4AKtYbs3ngDzh1K-78VrdIWnPJMjkVVRTQo_aem_AfdkXhsjCqJJ4C52npyQNIT8ZDod5nSp6jtqhYC8z0tgJREx4ZBuTvAdYFB3cbyV5CRf2B17mXGTGCVsRDEtvFiY